

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Návrh technologie výroby výtažku z plechu s využitím MKP

Project of Production Technology of the Stamping from Sheet-metal with the Use of FEM

Student:

Jiří Smrček

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Radek Čada, CSc.

Ostrava 2010

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Smrček**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Specializace: 70 Strojírenská technologie
Téma: **Návrh technologie výroby výtažku z plechu s využitím MKP**
Project of Production Technology of the Stamping from Sheet-metal
with the Use of FEM

Zásady pro vypracování:

1. Popište stávající technologický postup výroby zadané součásti z plechu.
2. Experimentálně vyhodnoťte tvářitelnost používaného plechu.
3. Navrhněte tvar zadané součásti jako výtažku při dodržení technologičnosti konstrukce.
4. Pro zadanou součást, řešenou jako výtažek, sestrojte tvar přístřihu více metodami a vzájemně je porovnejte.
5. Proveďte simulaci procesu tažení zadané součásti s využitím programu Dynaform 5.2.
Vyhodnoťte tloušťku výtažku po tažení, ztenčení, deformace a jejich znázornění v diagramu mezních deformací, rozložení normálové deformace a pohyb okraje přístřihu při tažení.
6. Analyzujte kritická místa na výtažku a v případě potřeby proveďte úpravy tvaru součásti s cílem snížit nebo odstranit rizika vzniku prasklin při tažení. Pokud bude tvar součásti upravován, proveďte simulace procesu tažení pro každou alternativu.
7. Proveďte finální návrh technologie výroby zadané součásti z plechu tažením a ekonomický rozbor, při jakém počtu kusů součástí se navržený způsob výroby vyplatí.

Seznam doporučené odborné literatury:

- ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha : Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
- ČSN ISO 5966 *Dokumentace. Formální úprava vědeckých a technických zpráv*. Praha : Český normalizační institut, leden 1996. 31 s.
- ČSN ISO 7144 *Dokumentace. Formální úprava disertací a podobných dokumentů*. Praha : Český normalizační institut, březen 1997. 21 s.
- ČSN ISO 31-0 *Veličiny a jednotky. Část 0: Všeobecné zásady*. Praha : Český normalizační institut, prosinec 1994. 24 s.
- ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
- PETRUŽELKA, J. *Ročníkový projekt. Jak psát bakalářskou práci* [online]. Ostrava : VŠB-TUO, FS, poslední aktualizace 21. 10. 2006 [cit. 2007-04-10]. Dostupný z www: <URL: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Jak%20psat.pdf>>.

ČADA, R. *Tvářitelnost ocelových plechů : odborná knižní monografie*. Lektorovali: L. Pollák a P. Rumišek. 1. vyd. Ostrava : REPRONIS, 2001. 346 s. ISBN 80-86122-77-8.
EVIN, E., HRIVŇÁK, A. A KMEC, J. Získavanie materiálových údajov pre numerickú simuláciu. In *Zborník prednášok 7. medzinárodnej konferencie TECHNOLOGIA 2001 : I. diel*. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2001. s. 281-284. ISBN 80-227-1567-0.

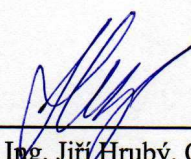
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Radek Čada, CSc.**


Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010





prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

21.5.2010



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2010



podpis

Jiří Smrček

Klubovní 89, Postřelmov 789 69

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SMRČEK, J. *Návrh technologie výroby výtažku z plechu s využitím MKP : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 65 s. Vedoucí práce: Čada, R.

Bakalářská práce se zabývá použitím metody konečných prvků při návrhu tvářeného dílce. V úvodní části je popsán stávající technologický postup výroby součásti. Následuje experimentální vyhodnocení tvářitelnosti použitého materiálu. V další fázi je s pomocí software DYNAFORM 5.2 provedena simulace procesu tažení pro navržené přístřihy, zkonstruované pomocí různých metod. Ve finální části je provedena analýza výtažku plechového dílu a na základě všech výsledků jsou navržena doporučení, vedoucí k racionalizaci stávající technologie výroby výtažku.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SMRČEK, J. *Project of Production Technology of the Stamping from Sheet-metal with the Use of FEM : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, 2010, 65 p. Thesis head: Čada, R.

The bachelor thesis deal with use of finite element method for designing of formed element. The first part describes the existing technological process of component production. Next part focuses on the experimental evaluation of the used material formability. In next step is software DYNAFORM 5.2 used for simulation of drag outs process for the proposed blanks designed by various methods. In the final part is examined the analysis of the stamping from the sheet-metal part. On the basis of all results the recommendations are proposed, which lead to the rationalization of existing stamping production technology.

OBSAH

	str.
Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Úvod	11
1 Představení společnosti, její historie a současnost	12
2 Rozbor stávající technologie výroby postranice odporníku	13
3 Vyhodnocení tvářitelnosti používaného plechu	17
3.1 Charakteristika a chemické složení používaného plechu	18
3.2 Stanovení mechanických vlastností zkouškou tahem	19
3.2.1 Provedení zkoušky tahem	20
3.3 Zkouška hloubením dle Erichsena	23
3.3.1 Provedení zkoušky hloubením dle Erichsena	23
3.4 Stanovení plošné anizotropie mechanických vlastností	25
3.5 Stanovení součinitelů plastické anizotropie používaného plechu	27
3.5.1 Provedení zkoušky pro stanovení hodnoty součinitelů plastické anizotropie	28
3.6 Exponent deformačního zpevnění	29
3.6.1 Stanovení exponentu deformačního zpevnění	31
3.7 Vyhodnocení zkoušek tvářitelnosti plechu DC01 Am	33
4 Kontrola technologičnosti konstrukce dané součásti	34
4.1 Stanovení tažné mezery mezi tažníkem a tažnicí	34
4.2 Poloměr zaoblení tažné hrany tažnice	35
4.3 Skutečné rozměry tažného nástroje	36
5 Tvar a velikost přístřihu	37
5.1 Stanovení tvaru přístřihu v programu DYNAFORM 5.2	37
5.2 Výpočet velikosti a tvaru přístřihu navrženého podle metody zmiňované M. Tišňovským	38
5.3 Porovnání přístřihů	40
6 Výpočet a simulace procesu tažení	41
6.1 Jednotlivé fáze MKP výpočtu	42
6.1.1 Tvorba geometrického modelu	42

6.1.2	Tvorba sítě elementů v programu DYNAFORM	42
6.1.3	Definice okrajových podmínek	45
6.2	Provedení vlastního výpočtu pomocí řešiče LS-DYNA	49
6.3	Zpracování výsledků simulace	49
7	Výsledky simulace procesu tažení	49
7.1	Simulace tažení postranice stavebnicového odporníku ze stávajícího přístřihu	50
7.2	Simulace tažení postranice stavebnicového odporníku přístřihu navrženého pomocí BSE modulu	52
7.3	Simulace tažení postranice stavebnicového odporníku z přístřihu navrženého podle metody zmiňované M. Tišňovským	55
7.4	Zhodnocení výsledků simulace tažení postranice stavebnicového odporníku	57
8	Stručný ekonomický rozbor a racionalizace stávající technologie výroby výtažku postranice stavebnicového odporníku	59
9	Závěr	62
10	Použitá literatura	64
11	Seznam příloh	65

Seznam použitých značek a symbolů

MKP	metoda konečných prvků	
A_{80}	tažnost materiálu při počáteční měřené délce zkušební tyče 80 mm	[%]
a	tloušťka plechu	[mm]
a_0	počáteční tloušťka zkušební tyče	[mm]
b_k	konečná měřená šířka zkušební tyče	[mm]
b_0	počáteční měřená šířka zkušební tyče	[mm]
C	pevnostní součinitel	[MPa]
d_1	průměr kulového zakončení razníku	[mm]
d_2	vnitřní průměr raznice	[mm]
d_3	vnitřní průměr přidržovače zkušebního tělesa	[mm]
d_4	vnější průměr raznice	[mm]
d_5	vnější průměr přidržovače zkušebního tělesa	[mm]
F	zatěžující síla	[N]
F_m	největší zatížení před porušením tyče	[N]
F_p	přidržovací síla	[N]
h_1	výška vnitřní válcové části raznice	[mm]
IE	hodnota prohloubení dle Erichsena	[mm]
L_k	konečná měřená délka zkušební tyče	[mm]
L_0	počáteční měřená délka zkušební tyče	[mm]
ΔL	prodloužení měřené délky zkušební tyče	[mm]
$\max \cdot A_{80}$	maximální hodnota tažnosti při počáteční měřené délce zkušební tyče 80 mm	[%]
$\max \cdot P$	maximální součinitel plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti	[%]
$\max \cdot R_m$	maximální hodnota meze pevnosti	[MPa]
$\max \cdot R_{p0,2}$	maximální hodnota smluvní meze kluzu způsobující plastickou deformaci 0,2 %	[MPa]
$\max \cdot R_{p0,2}/R_m$	maximální hodnota poměru smluvní meze kluzu způsobující plastickou deformaci 0,2 % k mezi pevnosti	[—]
$\min \cdot A_{80}$	minimální hodnota tažnosti při počáteční měřené délce zkušební tyče 80 mm	[%]

$\min \cdot R_m$	minimální hodnota meze pevnosti	[MPa]
$\min \cdot R_{p0,2}$	minimální hodnota smluvní meze kluzu způsobující plastickou deformaci 0,2 %	[MPa]
$\min \cdot R_{p0,2}/R_m$	minimální hodnota poměru smluvní meze kluzu způsobující plastickou deformaci 0,2 % k mezi pevnosti	[—]
n	exponent deformačního zpevnění	[—]
n_p	počet přístřihů získaných z jedné tabule plechu	[ks]
n_x	směrový exponent deformačního zpevnění	[—]
Δn	stupeň plošné anizotropie exponentu deformačního zpevnění	[—]
P	součinitel plošné anizotropie	[%]
p	počet tabulí plechu potřebných na roční výrobu výtažku	[ks]
p_p	měrný tlak	[MPa]
$p_{2\%}$	roční spotřeba tabulí plechu potřebná pro roční výrobu výtažků postranice při zmetkovitosti 2 %	[ks]
$p_{8\%}$	roční spotřeba tabulí plechu potřebná pro roční výrobu výtažků postranice při zmetkovitosti 8 %	[ks]
Q	počet výtažků postranice vyrobených za rok	[ks]
R	poloměr v rozích obdélníkového přístřihu	[mm]
R_c	poloměr kruhového přístřihu	[mm]
R_e	výrazná mez kluzu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu působící plastickou deformaci 0,2 %	[MPa]
R_m	pevnost v tahu	[MPa]
\bar{r}	vážený průměr součinitele plastické anizotropie	[—]
r_p	poloměr zaoblení tažné hrany tažnice	[mm]
r_t	poloměr zaoblení tažné hrany tažníku	[mm]
r_x	směrový součinitel plastické anizotropie	[—]
r_1	minimální poloměr zaoblení tažné hrany tažníku	[mm]
r_2	minimální poloměr zaoblení tažné hrany tažnice	[mm]
S	plocha přístřihu	[mm ²]
S_k	konečná plocha příčného průřezu zkušební tyče po provedené zkoušce tahem	[mm ²]
S_p	účinná plocha přidržovače	[mm ²]

S_0	počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče před provedením zkoušky tahem	[mm ²]
s	tloušťka plechu	[mm]
t_{m1}	tažná mezera v podélné stěně výtažku	[mm]
t_{mr1}	tažná mezera v rozích výtažku	[mm]
z	zmetkovitost při výrobě výtažku postranice stavebnicového odporníku	[%]
ε	poměrné prodloužení zkušební tyče	[—]
$\bar{\varepsilon}$	skutečné poměrné prodloužení zkušební tyče	[—]
σ	okamžité skutečné napětí při okamžitém zatížení	[MPa]
φ	logaritmická deformace	[—]

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a optimalizací technologie výroby výtažku postranice s využitím software DYNAFORM. Tento výrobek je součástí opláštění stavebnicového odporníku vyráběného v podniku Slovácké strojírny, a. s., SUB-ZÁVOD 07 MEP Postřelmov.

Při sériové výrobě výtažku postranice stavebnicového odporníku dochází v malé míře ke vzniku prasklin v rozích výtažku. Tato vada, která je nepřijatelná, v celkové produkci představuje hodnotu zmetkovitosti přibližně 8 %.

Cílem práce bude zkontrolovat správnost technologie, která je používána při výrobě tvarového výtažku postranice stavebnicového odporníku.

Úvodní kapitoly budou věnovány konstrukčnímu popisu jednotlivých typů stavebnicových odporníků a rozboru stávající technologie výroby postranice, která je součástí jeho opláštění. Další část se bude zabývat vyhodnocením tvářitelnosti použitého plechu. Součástí této práce bude návrh optimálního tvaru přístřihu výchozího polotovaru.

Pro všechny navržené alternativy přístřihu bude provedena simulace tažení plechu pomocí programu DYNAFORM 5.2. Následně budou porovnány a vyhodnoceny získané výsledky simulací s pomocí analýzy normálové deformace, analýzy využívající diagram mezních deformací a analýzy tloušťky a ztenčení materiálu při tažení.

V závěrečné kapitole bude provedeno shrnutí získaných výsledků a provedených výpočtů. Bude analyzován jejich přínos pro výrobu postranice stavebnicového odporníku.

1 Představení společnosti, její historie a současnost

MEP Postřelmov, jako právní nástupce MEZ Postřelmov, je jeden z nejstarších podniků s elektrotechnickou výrobou v regionu severní Moravy. Elektrotechnické přístroje se v podniku vyrábějí od roku 1931, kdy byla založena panem J. Wágnerem z Olomouce firma se zaměřením na výrobu přístrojů nízkého napětí, elektrických motorových spouštěčů, odporníků a signálního osvětlení pro letiště a železnice. Od roku 1939 do roku 1945 patřil závod firmě Metzenauer & Jung z Wuppertalu. V této době byla výroba soustředěna z větší části na nízkonapěťové přístroje pro armádu. Poválečné začlenění do Moravských elektrotechnických závodů se sídlem v Olomouci trvalo do roku 1947, kdy byl založen národní podnik MEZ Postřelmov. Největší rozvoj a výstavba podniku proběhla v 50. a 60. letech, kdy současně s výstavbou základního závodu a pobočného závodu v Zábřehu byla vybudována slévárna a galvanovna. Podnik se tak postupně stal důležitým článkem v systému průmyslu tehdejší Československé socialistické republiky.



Obr. 1.1 Letecký snímek podniku MEP Postřelmov, a. s.

V současné době hlavní produkci společnosti tvoří výroba elektrických přístrojů a rozvaděčů pro oblast elektrické dopravy, energetiky a strojírenství. Dále podnik vyrábí strojírenské díly a sestavy, odlitky z hliníkových slitin a provádí povrchové úpravy kovů. Zajišťuje si sám technický provoz strojního a technologického zařízení, budov a energetického hospodářství. V roce 2009 došlo ke spojení firem MEP Postřelmov, a. s. a Slovácké strojírny, a. s. Firma nadále funguje jako dceřiná společnost pod obchodní značkou Slovácké strojírny, a. s., SUB-ZÁVOD 07 MEP Postřelmov.

2 Rozbor stávající technologie výroby postranice stavebnicového odporníku

Stavebnicové odporníky (obr. 2.1) jsou přístroje s přirozeným vzdušným chlazením. Jednotlivé odporové bloky se skládají mechanicky i elektricky v jeden montážní celek. Nestačí-li jeden celek pro požadovaný výkon či ohmickou hodnotu, vytvoří se odporník z několika celků. Tyto odporníky se používají pro spouštění, brzdění a regulaci motorů v průmyslových zařízeních s přerušovaným provozem jeřábového charakteru.



Obr. 2.1 Stavebnicový odporník SOP 33 konstruovaný pro regulaci ovládání jeřábového motoru při trvalém zatížení 30 kW v krytí IP13 podle ČSN EN 60 529

Stavebnicový odporník je vyráběn ve třech základních provedeních:

a) typ SOV:

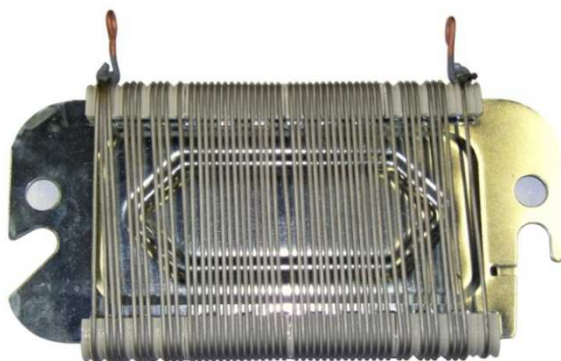
Základní jednotka odporníku typu SOV má dvě lisovaná plechová čela, mezi nimiž je uchycena svařovaná kostra z úhelníků, která nese držáky, na nichž jsou nasunuty snadno vyměnitelné odporové články. Odporový článek typu SOV (obr. 2.2) je tvořen odporovým válečkem, který se skládá z porcelánového tělíska, na kterém je navinut odporový drát a posuvné svorky.



Obr. 2.2 Odporový článek složený z porcelánového tělíska
s navinutým odporovým drátem

b) typ SOC:

Základní jednotka odporníku typu SOC má dvě lisovaná plechová čela, vzájemně spojená dvěma nosníky, která nesou odporový svazek. Svorníky jsou opatřeny izolačními trubkami, na kterých jsou nasunuty snadno vyměnitelné odporové články typu SOC (obr. 2.3). Každý z nich je tvořen drátovou cívkou, která se skládá z nosného plechového držáku, opatřeného keramickými sedly, na kterých je navinut odporový drát.



Obr. 2.3 Odporový článek složený s plechového držáku,
keramických sedel a odporového drátu

c) typ SOP:

Základní jednotka odporníku typu SOP má dvě lisovaná plechová čela, spojená dvěma svorníky, které nesou svazek odporových článků. Jsou opatřena otvory pro upevnění odporníků na základnu a pro vzájemné spojení jednotek mezi sebou. Svorníky jsou opatřeny izolačními trubkami, na kterých jsou navlečeny odporové články. Elektrické spojení článků mezi sebou je provedeno bodovým svářením, které vytváří z odporového svazku nerozebíratelný celek. Odporové články typu SOP (obr. 2.4) jsou raženy z nerezového plechu do tvaru meandru.



Obr. 2.4 Odporový článek tvořený
meandrem s rozpěrnou izolací

K výrobě postranice stavebnicového odporníku (obr. 2.5) se používá ocel s označením dle ČSN EN 10027-1 DC01 Am. Materiál je odebírán převážně od firmy Feron, a. s. a součástí dodávky je jeho atest (viz příloha A1.1), kterým dodavatel potvrzuje jeho metalurgické složení a mechanické vlastnosti. Objednávka je prováděna na základě údajů z vnitropodnikového informačního systému TPV2000 a DIMENZE, kdy je tomuto materiálu přiřazen jedinečný klíč, jenž určuje potřebné informace jako je jakost, rozměr a kvalita povrchu tabule.

Výchozí materiál pro výrobu postranice stavebnicového odporníku ocel DC01 Am je vhodný k tvářecím procesům pro nenáročné výtažky, na ohýbání a lemování zastudena.

Lisování polotovaru postranice je prováděno na hydraulickém lisu VEB 1600, který byl vyroben bývalou východoněmeckou firmou VEB kombinat Umformtechnik (viz příloha A1.2). Ročně je vyrobeno v závislosti na objednávkách přibližně 2500 kusů tohoto dílu.



Obr. 2.5 Postranice stavebnicového odporníku

Postranice stavebnicového odporníku je vyráběna z tenkého ocelového plechu DC01 Am, dodávaného v tabulích o rozměrech 1,50 mm × 2000 mm × 1000 mm. Přístřihy o rozměru 1,50 mm × 490 mm × 310 mm jsou zhotovovány průběžně na stříhacím centru CNT2500, které bylo vyrobeno slovenskou firmou Formetal Piesok. Poté následují další, převážně tvářecí operace dle technologického postupu výroby (viz příloha A1.3).

3 Vyhodnocení tvářitelnosti používaného plechu

Tvářitelnost je schopnost tvářeného objektu se plasticky deformovat za obecných podmínek tváření bez porušení celistvosti materiálu [1].

Tvářitelnost kovů lze popsat pomocí dvou definic:

- a) Tvářitelnost kovů je velikost deformace, kterou kov může snést bez částečného nebo úplného porušení celistvosti při dané teplotě a rychlosti deformace [1].
- b) Tvářitelnost kovů je stupeň deformace při jednotlivých procesech zpracování kovů tvářením, který nevyvolává na konečném výlisku nežádoucí jevy [1].

Při výrobě výtažků je důležité pro dodržení spolehlivosti jejich výroby znát nejen vlastnosti finálního výtažku, ale zejména je třeba posuzovat vhodnost plechu k hlubokému tažení. Ke stanovení tvářitelnosti materiálů byla vypracována řada zkoušek, které lze v zásadě rozdělit do dvou základních skupin a to na zkoušky základní a napodobující. Pro úplné popsání materiálu lze použít nekonvenční kritéria hodnocení tvářitelnosti plechu, jejichž je umožněna racionálnější volba výchozích polotovarů, nástřihových plánů a návrhu konstrukcí tvářecích nástrojů.

Rozdělení zkoušek používaných pro posouzení tvářitelnosti plechů:

- a) Zkoušky základní,

Mezi základní normalizované zkoušky patří zkouška tahem, zkouška tvrdosti, zkouška mikrostruktury a mikročistoty, zkouška jakosti povrchu, chemický rozbor, rentgenografická difrakce atd.

- b) Zkoušky napodobující,

Existuje jich celá řada, z nichž nejznámější je zkouška hloubením dle Erichsena, zkouška kalíškovací, zkouška hydraulická atd.

- c) Nekonvenční kritéria hodnocení tvářitelnosti plechu.

Mezi nekonvenční kritéria hodnocení tvářitelnosti plechů patří součinitelé plastické a plošné anizotropie a exponent deformačního zpevnění. Tyto parametry slouží pro stanovení tvářitelnosti plechu pro konkrétní tvary výtažků a také pro zatřídění plechů z pohledu jejich tvářitelnosti [1].

3.1 Charakteristika a chemické složení používaného plechu

Díl postranice stavebnicového odporníku je vyráběn tvářením zastudena. U ocelových materiálů vhodných pro tento druh výroby se požaduje zejména co nejnižší mez kluzu R_e , poměr meze kluzu a meze pevnosti (R_e/R_m) roven přibližně 0,6 a tažnosti A_{80} dosahující minimální hodnoty 45 %. Nejjakostnější druhy ocelí pro hluboké tažení dosahují maximální hodnoty výrazné meze kluzu $R_e = 160$ MPa. U těchto materiálů je také požadována odolnost proti stárnutí.

Předepsané chemické složení a mechanické vlastnosti hlubokotažných ocelí válcovaných zastudena používaných pro ploché výrobky udává norma ČSN EN 10130+A1. Směrné chemické složení materiálu DC01 Am je uvedeno v tab. 3.1, směrné mechanické vlastnosti v tab. 3.2.

Tab. 3.1 Směrné chemické složení plechu DC01 Am dle ČSN EN 10130+A1

Chemické složení rozboru tavby dle ČSN EN 10130+A1			
C	Mn	P	S
max [hmotn. %]	max [hmotn. %]	max [hmotn. %]	max [hmotn. %]
0,120	0,600	0,045	0,045

Tab. 3.2 Směrné hodnoty mechanických vlastností plechu DC01 Am dle ČSN EN 10130+A1

Označení oceli podle ČSN EN 10027-1	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
DC01 Am	max 235	270 ÷ 410	min 28

Jakost povrchu materiálu je charakterizována druhem a provedením povrchu. Označení plechu DC01 Am dle ČSN EN 10130+A1 značí, že se jedná o plech s matným povrchem (m) se střední hodnotou drsnosti $0,6 \mu\text{m} < R_a < 1,9 \mu\text{m}$ a s druhem povrchu (A), u kterého jsou dovoleny vady jako póry, malé rýhy, malé výstupky, drobná poškrábání a slabé zabarvení, které nezhoršují jeho vhodnost ke tvářením a přilnavost povrchových povlaků.

Materiál na výrobu postranice dodává firma Ferona, a. s. a součástí dodávky byl atest o zkouškách č. 60515102 (viz příloha A1.1). Atest obsahoval údaje o chemickém složení, rozměru dodaného materiálu a mechanických vlastnostech (viz tab. 3.3).

Tab. 3.3 Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu DC01 Am dodaného firmou Ferona, a. s., uvedené v atestu č. 60515102

Označení oceli podle ČSN EN 10027-1			DC01 Am	
Číslo tavby			17545	
Rozměr materiálu dle ČSN EN 10131/06			1,5 mm × 1000,0 mm × 2000 mm	
Chemické složení				
C	Mn	Si	P	S
[hmotn. %]	[hmotn. %]	[hmotn. %]	[hmotn. %]	[hmotn. %]
0,040	0,340	0,301	0,018	0,013
Mechanické vlastnosti				
R_e	[MPa]	181		
R_m	[MPa]	318		
A_{80}	[%]	45,5		

3.2 Stanovení mechanických vlastností zkouškou tahem

Metody zjišťování základních mechanických vlastností jsou založeny na principu působení vnějších mechanických sil na zkušební vzorek, vyrobený ze zkoušeného materiálu s cílem stanovit číselné hodnoty materiálových charakteristických veličin.

Zkouška tahem kovových materiálů se v ČR řídí normou ČSN EN 10002-1. Při zkoušce tahem dochází k zatěžování zkušební tyče statickým jednoosým tahem a obvykle končí destrukcí zkušebního vzorku. Je prováděna při okolní teplotě v rozmezí 10 °C až 35 °C a rychlost zatěžování se pohybuje od 0,5 mm·min⁻¹ do 2,0 mm·min⁻¹.

Pro potřeby vyhodnocení mechanických vlastností materiálu je důležitá zejména znalost pevnosti v tahu R_m , smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, což je hodnota napětí způsobující plastickou deformaci 0,2 % a tažnosti A_{80} při měřené počáteční délce zkušební tyče 80 mm.

a) Pevnost v tahu – napětí odpovídající největšímu zatížení:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3.1)$$

kde jsou F_m – největší zatížení před porušením tyče [N],

S_0 – počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče [mm²].

- b) Tažnost – poměr délky měřené části zkušební tyče po přetržení k původní délce, vyjádřený v procentech:

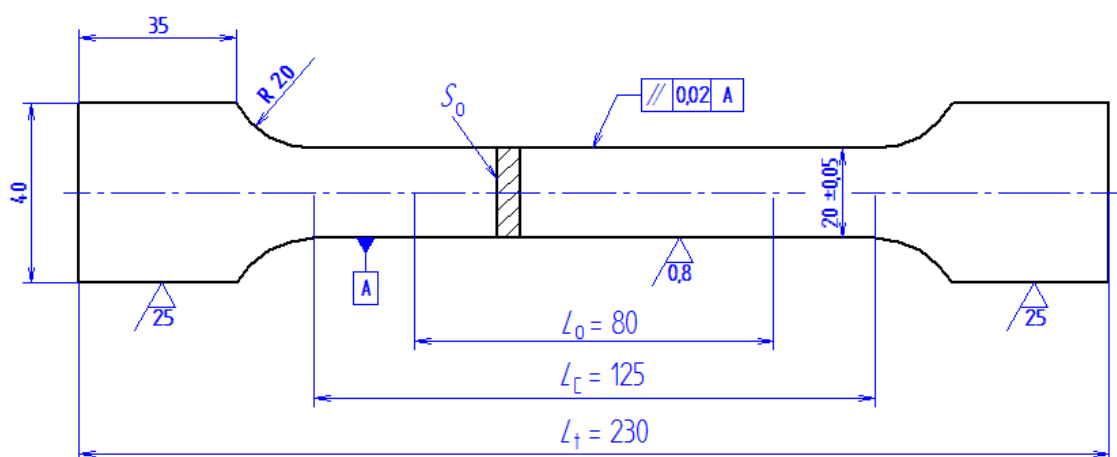
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.2)$$

kde jsou L_u – konečná měřená délka zkušební tyče [mm],

L_0 – počáteční měřená délka zkušební tyče [mm].

3.2.1 Provedení zkoušky tahem

Z plechové tabule byl odebrán materiál na vzorky s přihlédnutím k orientaci vůči směru válcování plechu. Pro každý ze směrů 0°, 45° a 90° vůči směru válcování plechu byly vyrobeny tři přístřihy o rozměru 230 mm × 40 mm. Takto připravené vzorky byly použity jako polotovary pro výrobu zkušebních tyčí, které byly zhotoveny v souladu s normou ČSN EN 10002-1.



Obr. 3.1 Rozměry ploché zkušební tyče vyráběné dle ČSN EN 10002-1

Zkouška byla provedena na zkušebním zařízení UTS 20 Testsystem ve firmě MEP Postřelmov (obr. 3.2). Jedná se o elektromechanický zkušební trhač s číslicovým řízením s možností grafického výstupu.

Připravená zkušební tyč byla upnuta do čelistí trhače, poté zatěžována tahem předepsanou rychlostí deformace. Byl sledován grafický průběh závislosti prodloužení tyče ΔL na zatěžující síle F až do její destrukce.

Pro možnost porovnávání výsledků byly tyto hodnoty přepočteny na poměrné prodloužení $\varepsilon = \Delta L/L_0$ a na napětí $\sigma = F/S_0$, kde L_0 je počáteční měřená délka zkušební tyče a S_0 počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče.



Obr. 3.2 Elektromechanické zkušební zařízení UTS 20 Testsystem

V každém ze směrů 0° , 45° a 90° vůči směru válcování plechu byly podrobeny zkoušce tahem tři zkušební tyče. Na každé zkušební tyči bylo ryskami provedeno vyznačení počáteční délky L_0 s přesností 1 %. Třmenovým mikrometrem byla s přesností 2 % na třech místech změřena počáteční šířka b_0 a počáteční tloušťka zkušební tyče a_0 . Z aritmetických průměrů naměřených hodnot byla stanovena počáteční plocha S_0 . Po přetržení zkušební tyče byla z monitoru zkušebního přístroje odečtena hodnota pevnosti v tahu R_m . Pro výpočet tažnosti A_{80} byla posuvným měřítkem změřena s přesností na 0,1 mm konečná délka zkušební tyče L_u . Směrové hodnoty mechanických vlastností plechu byly vypočítány jako aritmetický průměr z těchto tří naměřených hodnot.

Střední hodnoty jednotlivých mechanických vlastností (pevnost v tahu R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a tažnost A_{80}) použitého materiálu byly vypočteny dle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{x_0 + x_{90} + 2 \cdot x_{45}}{4} \quad (3.3)$$

kde je x – hodnota příslušné mechanické vlastnosti.

Postupně byly podrobeny zkoušce tahem všechny vzorky. Výsledné směrové a střední hodnoty mechanických vlastností získaných zkouškou tahem jsou uvedeny v tab. 3.4. Směrné mechanické vlastnosti použitého materiálu jsou uvedeny v tab. 3.2.

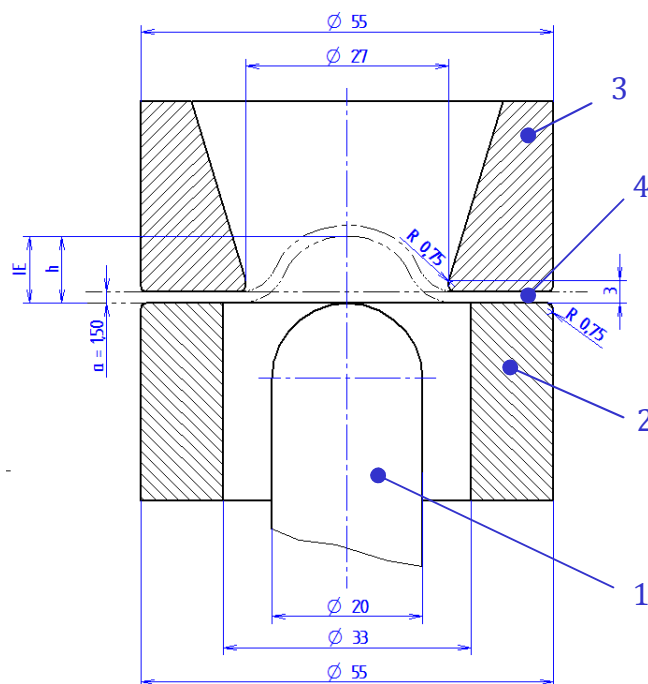
Tab. 3.4 Zjištěné směrové a střední hodnoty mechanických vlastností materiálu

Označení oceli podle ČSN EN 10027-1		DC01 Am			
Číslo tavby		17545			
Jmenovitá tloušťka plechu		<i>a</i> [mm]	1,50 mm		
Mezní úchylka tloušťky plechu dle ČSN EN 10131		± 0,10			
Rozměry zkušební vzorku dle ČSN EN 10002-1		230 mm × 40 mm			
Počáteční měřená délka		<i>L</i> ₀ [mm]	80		
Jmenovitá šířka zkušební tyče		<i>b</i> [mm]	20 ±0,105		
Mechanické vlastnosti		Úhel vůči směru válcování plechu			Střední hodnota
		0°	45°	90°	
<i>R</i> _m	[MPa]	310,9	318,8	311,4	315,0
<i>R</i> _{p0,2}	[MPa]	207,0	205,3	196,7	203,6
<i>R</i> _{p0,2} / <i>R</i> _m	[-]	0,666	0,644	0,632	0,646
<i>A</i> ₈₀	[%]	37,9	37,3	36,4	37,2

Zkouškou tahem dle ČSN EN 10002-1 bylo prokázáno, že hodnoty prověřovaných mechanických vlastností zkoušeného materiálu DC01 Am (pevnost v tahu R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a tažnost A_{80}) vyhověly požadavkům předepsaným dle normy ČSN EN 10130+A1 (viz tab. 3.2 a tab. 3.4).

3.3 Zkouška hloubením dle Erichsena

Zkouška se provádí dle ČSN EN ISO 20482. Tažník s kulovým zakončením (obr. 3.3) je postupně zatlačován do upnutého zkušební tělesa a vytváří prohloubení. Hodnotícím kritériem je hloubka vniknutí tažníku do zkoušeného materiálu, měřená s přesností na 0,1 mm v okamžiku vzniku průchozí praskliny. Tato zkouška je pro svoji jednoduchost a rychlost velice často používána v praxi.



Obr. 3.3 Schematické znázornění pracovního prostoru zkoušky
(1 – tažník, 2 – přidržovač, 3 – tažnice, 4 – zkušební vzorek, a – tloušťka zkušební vzorku, h – měřená hodnota prohloubení)

3.3.1 Provedení zkoušky hloubením dle Erichsena

Z plechové tabule byly nastříhány tři zkušební vzorky o rozměrech 500 mm × 100 mm. Zkouška byla provedena na elektromechanickém zkušebním zařízení UTS 20 Testsystem ve firmě MEP Postřelmov (obr 3.2).

Před každou zkouškou byly kontaktní plochy zkoušeného vzorku a tažníku namazány mazivem s obsahem grafitu 23 % až 28 %. Zkoušený vzorek byl upnut mezi přidržovač a tažnici přitlačnou silou 10 kN. Tažník byl posunut do kontaktního bodu s materiálem. Od tohoto místa byla následně měřena hloubka prohloubení.

Rychlostí $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo zahájeno vtlačování tažníku do zkoušeného vzorku. Zkouška byla ukončena v momentě, kdy došlo vlivem deformace zkoušeného materiálu ke vzniku průchozí trhliny. Výsledná hodnota prohloubení byla následně odečtena z monitoru zkušebního zařízení z diagramu síla/posuv razníku.

Na každém zkušebním vzorku byla zkouška zopakována celkem čtyřikrát. Následné prohloubení bylo provedeno po posunutí o 100 mm od středu předchozího prohloubení. Průměrná tloušťka zkušebního tělesa byla stanovena s přesností 0,01 mm, jako aritmetický průměr z pěti měření mikrometrickým šroubem 0-25/0,01 mm dle ČSN 25 1451.

Střední hodnota prohloubení dle Erichsena \overline{IE} byla vypočítána jako aritmetický průměr ze všech dvanácti provedených měření. Výsledné hodnoty prohloubení ověřovaného materiálu jsou zaznamenány v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Výsledky zkoušek hloubením dle Erichsena materiálu DC01 Am

Označení oceli podle ČSN EN 10027-1				DC01 Am	
Číslo tavby				17545	
Jmenovitá tloušťka plechu				a [mm]	1,50
Mezní úchylka tloušťky plechu dle ČSN EN 10131				$\pm 0,10$	
Rozměry zkušebního vzorku				500 mm \times 100 mm	
Průměr kulového zakončení razníku				d_1 [mm]	20 \pm 0,05
Vnitřní průměr raznice				d_2 [mm]	27 \pm 0,05
Vnitřní průměr přidržovače zkušebního tělesa				d_3 [mm]	33 \pm 0,10
Vnější průměr raznice				d_4 [mm]	55 \pm 0,10
Vnější průměr přidržovače zkušebního tělesa				d_5 [mm]	55 \pm 0,10
Číslo vzorku	IE [mm]				Měřená tloušťka plechu a
	Číslo měření				
	1	2	3	4	
1	11,2	11,8	11,7	11,8	1,48
2	11,8	11,5	12,0	12,0	1,47
3	12,0	11,9	11,7	11,8	1,46
Střední hodnota tloušťky plechu				\bar{a} [mm]	1,47
Střední hodnota prohloubení dle Erichsena				\overline{IE} [mm]	11,8

Dle ČSN 41 1321 je předepsána pro materiál DC01 tloušťky 1,5 mm nejnižší hodnota prohloubení dle Erichsena $IE = 11,2$ mm. Měřením byla zjištěna střední hodnota prohloubení dle Erichsena $IE = 11,8$ mm, což vyhovuje hodnotě uvedené ve výše zmiňované normě.

3.4 Stanovení plošné anizotropie mechanických vlastností

Plošná anizotropie vzniká jako důsledek strukturní a krystalografické textury, které jsou spojeny s metalurgickými a výrobními podmínkami výroby plechů. Vyjadřuje rozdílnost mechanických a fyzikálních vlastností materiálu vzhledem ke směru válcování [3].

Pro zjištění plošné anizotropie se využívá výsledků zkoušky tahem dle ČSN EN 10002-1. Zkušební tyče musí být zhotoveny z plechu orientovaného ve směru 0°, 45° a 90° vůči směru válcování tabule. Vyhodnocení součinitelů plošné anizotropie je prováděno dle ČSN 42 0437.

Pro vyjádření součinitelů plošné anizotropie se vychází z následujících vztahů [3]:

$$PR_{p(x)} = \frac{R_{p(x)} - R_{p(0)}}{R_{p(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.4)$$

$$PR_{m(x)} = \frac{R_{m(x)} - R_{m(0)}}{R_{m(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.5)$$

$$P(R_p/R_m)_{(x)} = \frac{(R_p/R_m)_{(x)} - (R_p/R_m)_{(0)}}{(R_p/R_m)_{(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.6)$$

$$PA_{(x)} = \frac{A_{(x)} - A_{(0)}}{A_{(0)}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.7)$$

kde jsou P – součinitel plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti,

x – úhel zvoleného směru v rovině plechu vůči směru válcování.

Pro úplnost popisu průběhu anizotropie zkoumaného materiálu je vhodné vypočítat z následujících vztahů maximální součinitele plošné anizotropie [3]:

$$\max \cdot PR_p = \frac{\max \cdot R_{p0,2} - \min \cdot R_{p0,2}}{\min \cdot R_{p0,2}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.8)$$

$$\max \cdot PR_m = \frac{\max \cdot R_m - \min \cdot R_m}{\min \cdot R_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.9)$$

$$\max \cdot P(R_p/R_m) = \frac{\max \cdot R_{p0,2}/R_m - \min \cdot R_{p0,2}/R_m}{\min \cdot R_{p0,2}/R_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.10)$$

$$\max \cdot PA = \frac{\max \cdot A_{80} - \min \cdot A_{80}}{\min \cdot A_{80}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.11)$$

kde $\max \cdot P$ je maximální součinitel plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti, $\max \cdot R_{p0,2}$, $\max \cdot R_m$, $\max \cdot R_{p0,2}/R_m$, $\max \cdot A_{80}$ je maximální směrová hodnota smluvní meze kluzu, meze pevnosti, poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti a tažnosti, $\min \cdot R_{p0,2}$, $\min \cdot R_m$, $\min \cdot R_{p0,2}/R_m$, $\min \cdot A_{80}$ je minimální směrová hodnota smluvní meze kluzu, meze pevnosti, poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti a tažnosti.

Do vzorců (3.4) až (3.11) byly dosazeny zjištěné hodnoty směrových hodnot mechanických vlastností z tab. 3.4 a byly vypočítány hodnoty součinitele plošné anizotropie smluvní meze kluzu $PR_{p0,2}$, součinitele plošné anizotropie poměru smluvní meze kluzu k mezi pevnosti $P(R_{p0,2}/R_m)$, součinitele plošné anizotropie meze pevnosti v tahu PR_m , součinitele plošné anizotropie tažnosti PA_{80} a jejich maximální hodnoty. Hodnoty součinitelů plošné anizotropie jsou zaznamenány v tab. 3.6, hodnoty maximálních součinitelů plošné anizotropie jsou uvedeny v tab. 3.7.

Tab. 3.6 Hodnoty součinitelů plošné anizotropie příslušné mechanické vlastnosti materiálu DC01 Am

Označení oceli podle ČSN EN 10027-1		DC01 Am		
Číslo tavby		17545		
Jmenovitá tloušťka plechu		<i>a</i> [mm]	1,50	
Mezní úchylka tloušťky plechu dle ČSN EN 10131		± 0,10		
Rozměry zkušební vzorku dle ČSN EN 10002-1		230 mm × 40 mm		
Počáteční měřená délka		<i>L</i> ₀ [mm]	80	
Jmenovitá šířka zkušební tyče		<i>b</i> [mm]	20 ±0,105	
koeficient		Úhel vůči směru válcování plechu		
		0°	45°	90°
<i>PR</i> _{p0,2(x)}	[%]	0	-0,82	-4,98
<i>PR</i> _{m(x)}	[%]	0	2,54	0,16
<i>P</i> (<i>R</i> _{p0,2} / <i>R</i> _m) _(x)	[%]	0	-0,08	-0,11
<i>PA</i> _{80(x)}	[%]	0	-1,58	-3,96

Tab. 3.7 Maximální součinitelé plošné anizotropie plechu DC01 Am

Maximální součinitelé plošné anizotropie		ocel DC01 Am
$\max \cdot PR_{p0,2}$	[%]	5,24
$\max \cdot PR_m$	[%]	2,54
$\max \cdot P(R_{p0,2}/R_m)$	[%]	6,35
$\max \cdot PA$	[%]	4,12

3.5 Stanovení součinitelů plastické anizotropie používaného plechu

Plastická anizotropie plechů vyjadřuje nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu vůči mechanickým vlastnostem ve směru kolmém na rovinu plechu. Je vyjadřována bezrozměrným směrovým součinitelem plastické anizotropie r_x . Patří k nejvýznamnějším ukazatelům tvárnosti při plošném tváření. Jeho význam spočívá v tom, že vyjadřuje odolnost materiálu vůči ztenčování stěny v průběhu hlubokého tažení. Čím vyšší je hodnota tohoto součinitele, tím větší je odolnost materiálu ke ztenčování, a tedy je vhodnější pro hluboké tažení [3].

$$r_x = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{s_0}{s_k}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{L_k \cdot b_k}{L_0 \cdot b_0}} \quad [-] \quad (3.12)$$

kde jsou φ_b, φ_s – logaritmické deformace [–],

L_0, b_0, s_0 – počáteční rozměry zkušební tyče (délka, šířka, tloušťka) [mm],

L_k, b_k, s_k – konečné rozměry zkušební tyče (délka, šířka, tloušťka) [mm].

Jako kritérium tvárnosti materiálů se používá hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie \bar{r} . Toto kritérium není doposud ošetřeno normou. Orientačně lze pro hodnocení hlubokotažnosti materiálu použít následujících směrných hodnot [9]:

- a) $\bar{r} > 1,6$ – vynikající,
- b) $\bar{r} = 1,25 \div 1,6$ – dobrá,
- c) $\bar{r} = 1,0 \div 1,25$ – uspokojivá,
- d) $\bar{r} < 1,25$ – nízká,
- e) $\bar{r} < 0,7$ – velmi špatná.

Vážený průměr součinitele plastické anizotropie \bar{r} lze vyjádřit ze vztahu [3]:

$$\bar{r} = \frac{1}{4} \cdot (r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad [-] \quad (3.13)$$

kde jsou r_0, r_{45}, r_{90} – součinitelé plastické anizotropie ve směrech $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ vůči směru válcování plechu [–].

Plastická anizotropie je příčinou vzniku cípů, které zvyšují podíl odpadu materiálu při vlastní výrobě výrobku. V praxi bude umístění nerotačně symetrických a nesymetrických výtažků provedeno na příštířihu tak, aby směry maximálních

deformací byly natočeny po směru maximálních hodnot r_x . Pro hodnocení cípovitosti výtažků je používán stupeň plastické anizotropie Δr [9]:

$$\Delta r = \frac{1}{2} \cdot (r_0 + r_{90} - 2 \cdot r_{45}) \quad [-] \quad (3.14)$$

Vyhodnocení směru vzniklých cípů ke směru válcování zkoumaného materiálu je možno provést dle vztahů:

- a) $\Delta r = 0$ – cípy se netvoří,
- b) $\Delta r > 0$ – cípy se tvoří ve směru 0° a 90° ke směru válcování,
- c) $\Delta r < 0$ – cípy se tvoří ve směru 45° ke směru válcování.

3.5.1 Provedení zkoušky pro stanovení součinitelů plastické anizotropie

Z plechové tabule byly vyrobeny vzorky v souladu s normou ČSN EN 10002-1 pro výrobu plochých zkušebních tyčí. Zkouška byla provedena na zkušebním zařízení UTS 20 Testsystem ve firmě MEP Postřelmov. Na každém vzorku byla rýsovací jehlou ryskami vyznačena osa a také počáteční délka $L_0 = 80$ mm s přesností 1 %. Na třech místech každé tyče byla změřena jeho počáteční šíře s přesností 0,01 mm a byla vypočtena směrodatná šířka aritmetickým průměrem naměřených hodnot. Zkušební tyče byly namáhány jednoosým tlakem až do dosažení maximální rovnoměrné deformace, v tomto případě, kdy je prověřován ocelový plech válcovaný zastudena, přibližně do 20 % hodnoty poměrného prodloužení. Po odlehčení byla v ose zkoušené tyče změřena konečná délka L_k a ze třech získaných hodnot byla aritmetickým průměrem vypočtena také konečná šířka zkušební tyče b_k . Naměřené údaje jsou zaznamenány v tab. 3.8.

Hodnoty součinitelů plastické anizotropie ve směrech 0° , 45° a 90° vůči směru válcování plechu byly vypočítány jako aritmetický průměr z příslušných měření. Dle vztahů (3.13) a (3.14) byla vypočtena hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie \bar{r} a hodnota stupně součinitele plastické anizotropie Δr . Výsledné hodnoty měření pro zkoušený plech DC01 jsou uvedeny v tab. 3.9.

Tab. 3.8 Naměřené počáteční a koncové rozměry zkušebních tyčí z používaného materiálu DC01 Am

Označení vzorku	Počáteční rozměry vzorků			Konečné rozměry		Součinitel plastické anizotropie
	tloušťka	šířka	délka	šířka	délka	
	a_0	b_0	L_0	b_k	L_k	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
1/0°	1,48	19,93	80,00	19,25	85,26	1,20
2/0°	1,49	20,00	80,00	19,34	85,38	1,07
3/0°	1,47	20,03	80,00	19,34	85,46	1,14
1/90°	1,49	19,92	80,00	19,25	85,24	1,15
2/90°	1,46	19,92	80,00	19,26	85,34	1,09
3/90°	1,47	19,92	80,00	19,26	85,63	0,99
1/45°	1,47	19,94	80,00	19,34	85,35	0,89
2/45°	1,47	19,94	80,00	19,37	85,15	0,89
3/45°	1,47	19,97	80,00	19,39	85,22	0,88

Tab. 3.9 Vypočítané hodnoty součinitelů plastické anizotropie, váženého průměru součinitele plastické anizotropie a stupně součinitele plastické anizotropie

Označení oceli podle ČSN EN 10027-1	r_0 [—]	r_{45} [—]	r_{90} [—]	\bar{r} [—]	Δr [—]
DC01 Am	1,14	0,89	1,08	1,00	0,22

3.6 Exponent deformačního zpevnění

Intenzitu zpevňování plechu při plastické deformaci jednoosým tahem lze vyjádřit pomocí exponentu skutečné plastické deformace z matematické rovnice (3.15) vyjadřující závislost mezi skutečným napětím a skutečnou plastickou deformací. Jedná se o materiálovou konstantu, jejíž hodnota (pro hlubokotažné plechy vždy menší než 1) je závislá především na velikosti zrna a chemickém složení materiálu.

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n \quad [\text{MPa}] \quad (3.15)$$

kde jsou n – exponent deformačního zpevnění [—],

C – pevnostní součinitel [MPa].

Tato rovnice se může následujícím způsobem převést na logaritmickou:

$$\ln \sigma = \ln C + n \cdot \ln \bar{\varepsilon} \quad [—] \quad (3.16)$$

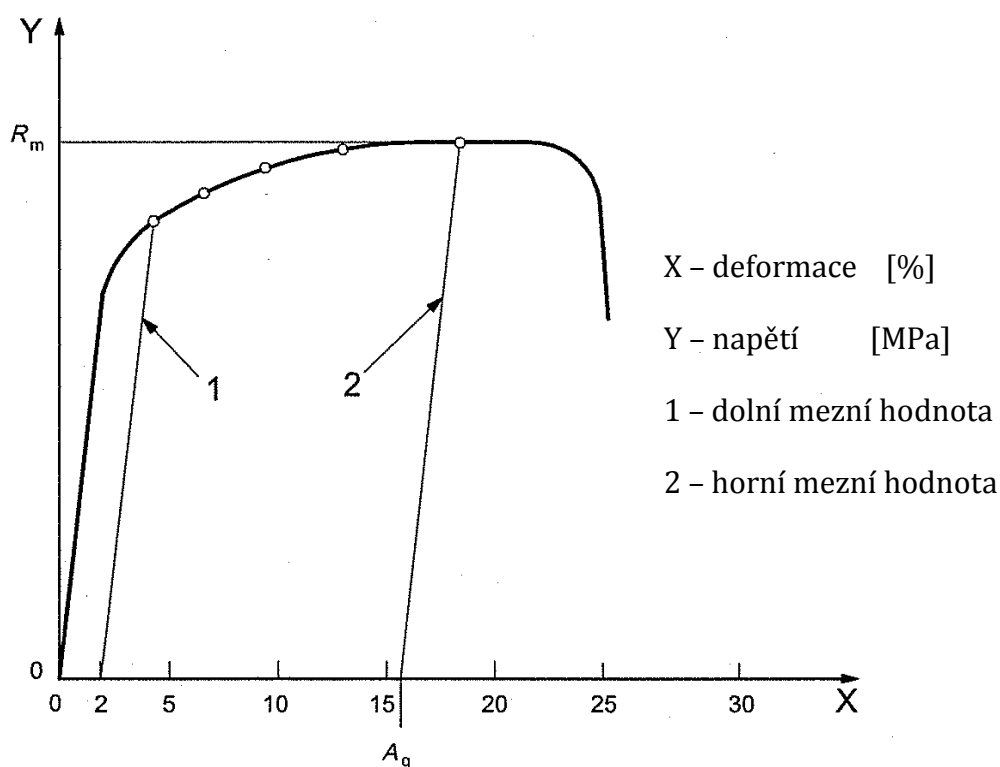
Skutečné poměrné prodloužení $\bar{\varepsilon}$ je dáno součtem malých deformací:

$$\bar{\varepsilon} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln(1 + \varepsilon) \quad [-] \quad (3.17)$$

kde je L – okamžitá délka měřeného vzorku [mm].

Skutečné napětí σ je možno určit ze smluvního napětí R :

$$\sigma = R(1 + \varepsilon) \quad [\text{MPa}] \quad (3.18)$$



Obr. 3.4 Grafické vyjádření závislosti napětí na deformaci s nevýraznou mezí kluzu a vyznačenou dolní a horní mezní hodnotou

Při vyhodnocování dat manuální metodou dle ČSN ISO 10275 lze vypočítat exponent minimálně z pěti bodů rozložených v geometrické posloupnosti (obr. 3.4) dle rovnice (3.16) pomocí metody nejmenších čtverců. Pro exponent deformačního zpevnění lze následně odvodit vztah:

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad [-] \quad (3.19)$$

kde $y = \ln \sigma, x = \ln \varepsilon$.

Jako kritérium tvářitelnosti plechu je používána průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění n_m vypočítaného ze vztahu (3.20). Čím vyšší je hodnota exponentu deformačního zpevnění, tím je zvolený materiál vhodnější při používání v aplikacích pro hluboké tažení.

$$n_m = \frac{1}{4} \cdot (n_0 + n_{90} + 2 \cdot n_{45}) \quad [-] \quad (3.20)$$

kde jsou n_0, n_{45}, n_{90} – exponenty deformačního zpevnění ve směrech $0^\circ, 45^\circ$ a 90° vůči směru válcování plechu.

Směrodatné hodnoty průměrného exponentu deformačního zpevnění n_m pro hodnocení tvářitelnosti plechů nejsou doposud ošetřeny normou. Dle odborné literatury může být provedeno třídění [3]:

- a) $n_m < 0,215$ – nízká tvářitelnost,
- b) $0,215 < n_m < 0,250$ – dobrá tvářitelnost,
- c) $n_m > 0,250$ – vynikající tvářitelnost.

3.6.1 Stanovení exponentu deformačního zpevnění

Z plechové tabule byly vyrobeny vzorky v souladu s normou ČSN EN 10002-1 pro výrobu plochých zkušebních tyčí. Zkouška byla provedena na zkušebním zařízení UTS 20 Testsystem ve firmě MEP Postřelmov. V každém ze směrů $0^\circ, 45^\circ$ a 90° vůči směru válcování plechu byly podrobeny zkoušce tahem tři zkušební tyče. Z každého grafu závislosti působící síly F na prodloužení vzorku ΔL bylo odečteno dle ČSN ISO 10275 pět potřebných údajů, které byly použity pro výpočet skutečných napětí a deformací dle vzorců (3.17) a (3.18). Vypočtené hodnoty skutečných napětí a deformací byly dosazeny do vztahů dle (3.19) a výsledky pro jednotlivé směry vzorků vůči válcování plechu zaneseny do tab. 3.10, tab. 3.11, a tab. 3.12. Směrové hodnoty exponentů deformačního zpevnění n_x byly vypočítány aritmetickým průměrem. Ze vztahu (3.20) byla vyčíslena hodnota exponentu deformačního zpevnění n_m . Výsledné hodnoty směrových exponentů a hodnota průměrného exponentu deformačního zpevnění jsou uvedeny v tab. 3.13.

Tab. 3.10 Naměřené a vypočtené hodnoty exponentu deformačního zpevnění
materiálu DC01 Am ve směru 0° vůči směru válcování plechu

číslo vzorku	Počáteční plocha		Působící síla	Prodloužení vzorku	Skutečné napětí	Skutečné poměrné prodloužení	Směrový exponent deformačního zpevnění
	S_0 [mm]		F [N]	ΔL [mm]	σ [MPa]	$\bar{\varepsilon}$ [—]	n_0 [—]
1/0°	29,52	1	6 615	2,17	230,11	0,027	0,24
		2	7 690	5,22	277,41	0,063	
		3	8 480	10,00	323,13	0,118	
		4	8 930	16,30	364,18	0,185	
		5	9 045	26,74	408,78	0,288	
2/0°	29,85	1	7 190	3,02	249,90	0,037	0,25
		2	8 040	6,51	291,31	0,078	
		3	8 710	11,16	332,54	0,131	
		4	9 140	20,23	383,53	0,225	
		5	9 260	26,74	413,88	0,288	
3/0°	29,51	1	7 270	4,19	259,15	0,051	0,25
		2	8 230	8,60	308,75	0,102	
		3	8 775	13,95	349,21	0,161	
		4	9 050	21,63	389,57	0,239	
		5	9 185	26,74	415,35	0,288	

Tab. 3.11 Naměřené a vypočtené hodnoty exponentu deformačního zpevnění
materiálu DC01 Am ve směru 45° vůči směru válcování plechu

číslo vzorku	Počáteční plocha		Působící síla	Prodloužení vzorku	Skutečné napětí	Skutečné poměrné prodloužení	Směrový exponent deformačního zpevnění
	S_0 [mm]		F [N]	ΔL [mm]	σ [MPa]	$\bar{\varepsilon}$ [—]	n_{45} [—]
1/45°	29,75	1	6 660	1,40	227,69	0,017	0,23
		2	7 960	5,12	284,78	0,062	
		3	8 875	11,16	339,98	0,131	
		4	9 400	20,00	394,89	0,223	
		5	9 530	29,77	439,49	0,316	
2/45°	29,95	1	7 420	3,26	257,79	0,040	0,23
		2	8 540	7,91	313,27	0,094	
		3	9 100	12,09	349,69	0,141	
		4	9 380	17,21	380,49	0,195	
		5	9 520	24,88	416,64	0,271	
3/45°	29,81	1	7 540	3,72	264,76	0,045	0,23
		2	8 580	8,37	317,92	0,100	
		3	9 065	12,79	352,66	0,148	
		4	9 200	16,98	374,22	0,192	
		5	9 550	25,12	420,87	0,273	

Tab. 3.12 Naměřené a vypočtené hodnoty exponentu deformačního zpevnění materiálu DC01 Am ve směru 90° vůči směru válcování plechu

číslo vzorku číslo vzorku	Počáteční plocha		Působící síla	Prodloužení vzorku	Skutečné napětí	Skutečné poměrné prodloužení	Směrový exponent deformačního zpevnění
	S_0 [mm]		F [N]	ΔL [mm]	σ [MPa]	$\bar{\epsilon}$ [—]	n_{90} [—]
1/90°	29,87	1	6 550	1,74	224,07	0,022	0,24
		2	7 665	4,78	271,91	0,058	
		3	8 515	9,35	318,40	0,111	
		4	9 040	15,43	361,00	0,176	
		5	9 300	27,17	417,16	0,292	
2/90°	29,93	1	7 650	4,65	270,49	0,056	0,25
		2	8 695	10,70	329,34	0,126	
		3	9 040	16,28	363,58	0,185	
		4	9 180	21,40	388,81	0,237	
		5	9 320	26,28	413,70	0,284	
3/90°	29,85	1	7 600	4,65	270,75	0,056	0,24
		2	8 600	9,77	323,66	0,115	
		3	9 030	14,88	358,64	0,171	
		4	9 165	20,00	383,81	0,223	
		5	9 305	26,98	416,82	0,291	

Tab. 3.13 Hodnoty exponentů deformačního zpevnění n_0 , n_{45} , n_{90} a hodnoty průměrného exponentu deformačního zpevnění n_m materiálu DC01 Am

Označení oceli podle ČSN EN 10027-1	n_0 [—]	n_{45} [—]	n_{90} [—]	n_m [—]
DC01 Am	0,25	0,23	0,24	0,24

3.7 Vyhodnocení zkoušek tvářitelnosti plechu DC01 Am

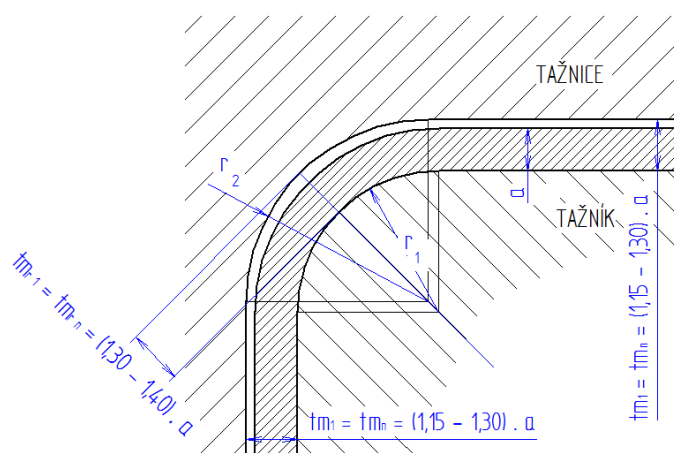
Zkouška tahem dle ČSN EN 10002-1 (viz 3.2) a také zkouška hloubením dle Erichsena (viz 3.3) dle ČSN EN ISO 20482 potvrdily, že dodávaný materiál DC01 Am od firmy FERONA, a. s., dosahuje u sledovaných mechanických vlastností (pevnost v tahu R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a tažnost A_{80}) požadovaných hodnot (viz tab. 3.2). Dále byl vypočten vážený průměr součinitele plastické anizotropie \bar{r} (viz tab. 3.9), podle kterého lze materiál DC01 Am zatřídit pro hodnocení tah – tlak mezi materiály s uspokojivou tvářitelností a průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění n_m (viz tab. 3.13), podle kterého lze tento materiál pro hodnocení tah – tah zatřídit mezi materiály vykazující dobrou tvářitelnost.

4 Kontrola technologičnosti konstrukce dané součásti

Tvar požadovaného dílce vyráběné postranice lze označit jako výtažek nerotačního tvaru. Výpočty a konstrukcí součástí tažidel dutých čtyřhranných výtažků se zabývá norma ČSN 22 7303. Tažení čtyřhranných výtažků bývá prováděno převážně s přidržovačem.

4.1 Stanovení tažné mezery mezi tažníkem a tažnicí

Tažná mezera mezi tažníkem a tažnicí u nerotačních výtažků má být větší než je tloušťka zpracovávaného materiálu, aby se jeho přebytek mohl při vytahování přemístit a nedocházelo k jeho nežádoucímu přechování. Je-li tažná mezera větší, dochází k přirozenému nárůstu tloušťky materiálu při tažení v rozích a zároveň k poklesu potřebné síly a snížení stupně zpevnění. Tento efekt má vliv na pevnost výtažku v rozích. Proto se volí tažná mezera (t_{m1} , t_{mr1}) různá v podélných i kruhově zaoblených bočních stěnách.



Obr. 4.1 Řez tažidlem kolmo ke směru tažení s vyznačením tažné mezery

Stanovení tažné mezery v podélné stěně:

$$t_{m1} = (1,15 \text{ až } 1,30) \cdot a \quad [\text{mm}] \quad (4.1)$$

Stanovení tažné mezery v rozích:

$$t_{mr1} = (1,30 \text{ až } 1,40) \cdot a \quad [\text{mm}] \quad (4.2)$$

kde je a – tloušťka taženého plechu [mm].

Postranice stavebnicového odporníku nepatří svými tvary mezi příliš komplikované výtažky. Z tohoto důvodu byly do výpočtů zvoleny přibližně střední hodnoty koeficientů:

Stanovení tažné mezery v podélné stěně:

$$t_{m1} = 1,2 \cdot a = 1,2 \cdot 1,5 = 1,80 \text{ mm}$$

Stanovení tažné mezery v rozích:

$$t_{mr1} = 1,3 \cdot a = 1,3 \cdot 1,5 = 1,95 \text{ mm}$$

Minimální rádius zaoblení tažné hrany tažníku byl dán konstrukcí výrobku $r_1 = 5,0 \text{ mm}$. Z hodnot výpočtů tažných mezer v podélné stěně a v rozích výtažku byl s pomocí programu Solid Edge přesně zkonstruován detail tažidla a bylo určeno minimální zaoblení dna a boční stěny tažnice $r_2 = 6,44 \text{ mm}$.

4.2 Poloměr zaoblení tažné hrany tažnice

Poloměr hran r_t značně ovlivňuje proces hlubokého tažení. Příliš nízké hodnoty poloměru hran značně zvyšují potřebnou tažnou sílu F a tím podporují vznik deformací dna vedoucí až k jeho utržení. Naproti tomu, příliš vysoká hodnota poloměru r_t vede ke vzniku nadměrného zvlnění materiálu a způsobuje, že funkce přidržovače ztrácí na svém významu. U čtyřhranného výtažku jsou poloměry zaoblení tažné hrany r_t tažnice a přidržovače závislé na tloušťce plechu a a jejich hodnota je počítána dle následujícího vzorce:

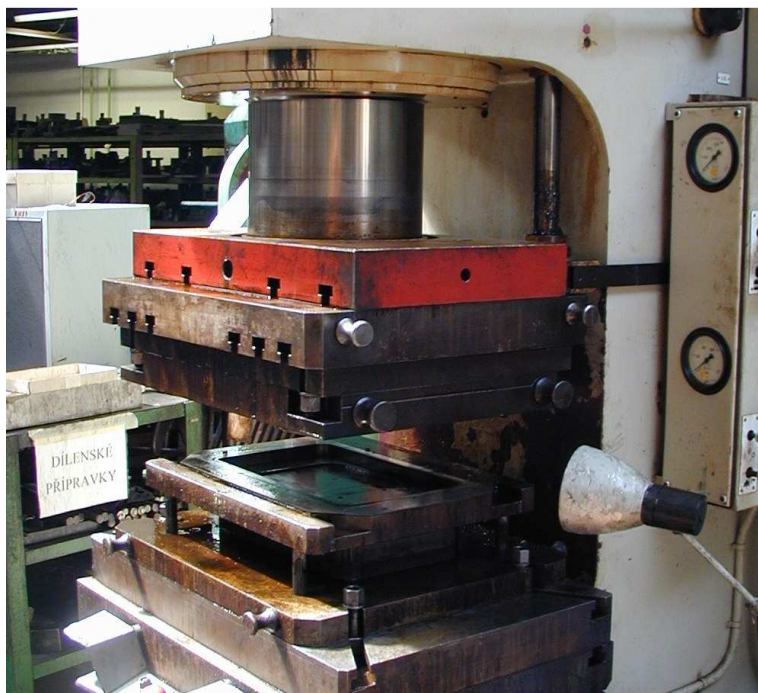
$$r_t = (6 \text{ až } 10) \cdot a \quad [\text{mm}] \quad (4.3)$$

kde je a – tloušťka taženého plechu [mm].

Po dosazení do vztahu (4.3) bylo zjištěno nejmenší zaoblení tažnice $r_t = 12 \text{ mm}$.

4.3 Skutečné rozměry tažného nástroje

Lisování polotovaru postranice je prováděno na hydraulickém lisu VEB 1600 za použití tažného nástroje označeného č. 650522 (obr. 4.2), který byl navržen a zkonstruován v nástrojárně firmy MEZ Postřelmov, n. p.



Obr. 4.2 Pohled na seřazený tažný nástroj č. 650522 pro výrobu postranice stavebnicového odporníku

Vzhledem k neexistující výrobní dokumentaci a potřebě znát skutečné rozměry nástroje pro potřeby simulace vlastního tváření pomocí software DYNAFORM, byly přeměřeny skutečné rozměry tažných mezer, poloměrů hran tažnice a tažníku. Výsledky měření jsou zaznamenány v tab. 4.1. Tyto naměřené hodnoty byly použity pro vytvoření 3D modelu tažníku a tažnice.

Tab. 4.1 Skutečné rozměry tažné mezery a zaoblení tažného nástroje č. 650522

Označení nástroje	Poloměr zaoblení tažné hrany tažníku	Poloměr zaoblení u dna tažnice	Poloměr zaoblení tažné hrany tažnice	Tažná mezera v podélné stěně
	r_1 [mm]	r_2 [mm]	r_t [mm]	t_{m1} [mm]
650522	5,00	6,50	6,00	1,85

5 Tvar a velikost přístřihu

Pro stanovení optimálního tvaru a velikosti alternativního přístřihu tvářeného dílu postranice stavebnicového odporníku byly využity následující způsoby:

- a) metoda využívající modul BSE programu DYNAFORM 5.2,
- b) stanovení velikosti a tvaru přístřihu podle M. Tišnovského [10].

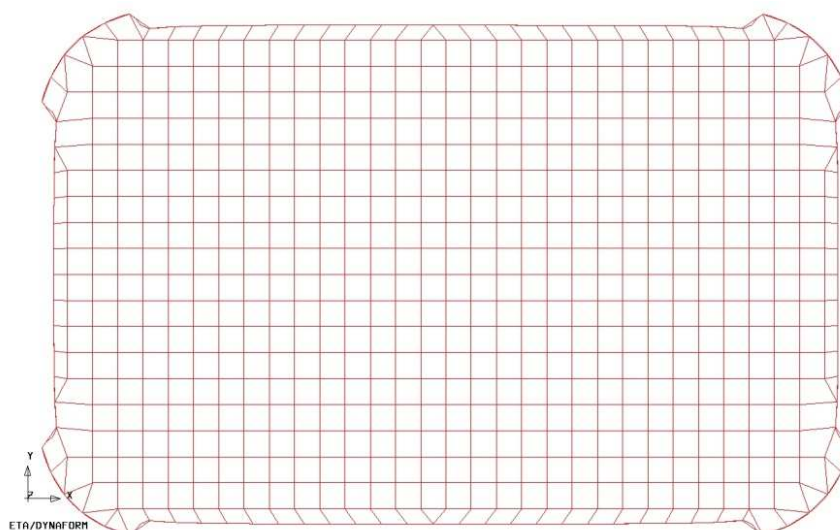
5.1 Stanovení tvaru a velikosti přístřihu v programu DYNAFORM 5.2

Software DYNAFORM 5.2 je vybaven modulem BSE, který umožňuje vygenerování požadovaného tvaru přístřihu. Do programu byl pomocí příkazu „Import“ vložen model konečného výtažku postranice s požadovanými přídávky na ostřížení (obr 5.1).



Obr. 5.1 Model konečného výtažku postranice stavebnicového odporníku s přídávky sloužící ke snadnému odstraňování výtažku z pracovního prostoru nástroje

Pro přípravu vytvoření samotného přístřihu byla pomocí příkazu v nabídce „Blank Size Estimate“ vytvořena hraniční čára („Boundary Line“), tvořící obrys přístřihu. Jako další krok byla vygenerována pomocí příkazu „Blank Generator“ z nabídky nástrojů „Tools“ dle obrysu přístřihu ohraničeného hraniční čarou sítí elementů konečných prvků. Důležitý parametr velikosti mřížky elementů („Tools Radii“), na jehož velikosti závisí přesnost konečného výpočtu, byl nastaven na hodnotu 6,0. Tento parametr odráží míru sepětí elementů s modelem a výrazně ovlivňuje dobu trvání výpočtu. Takto vytvořený přístřih (obr. 5.2) je připraven pro vlastní simulaci procesu tváření. Informativní výkres přístřihu pro výrobu postranice je v příloze A2.2.

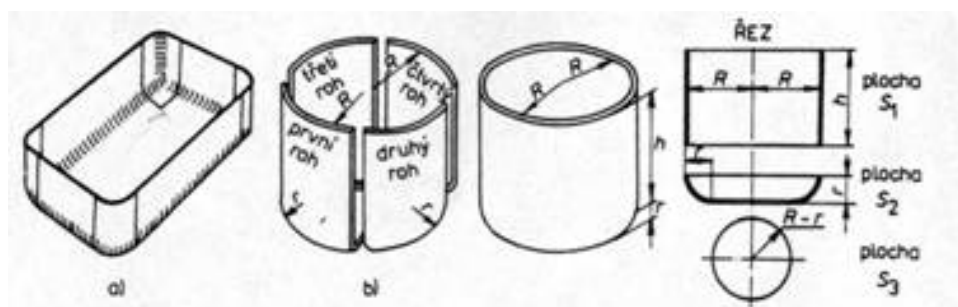


Obr. 5.2 Model přístřihu s vytvořenou sítí konečných prvků vygenerovaného programem DYNAFORM 5.2 s využitím BSE modulu

5.2 Výpočet velikosti a tvaru přístřihu podle metody zmiňované M. Tišňovským

Pro určení přibližného tvaru přístřihu s postačujícím množstvím materiálu pro tažení obdélníkového výtažku lze použít i metodu popisovanou v odborné literatuře [10].

Pokud má výtažek (obr. 5.3) zaoblené rohy u dna i v rozích, lze předpokládat, že celkové množství kovu potřebného k vytvoření všech čtyř rohů je stejné jako u válcového výtažku shodné výšky a průměru rovného dvojnásobku rohového poloměru.

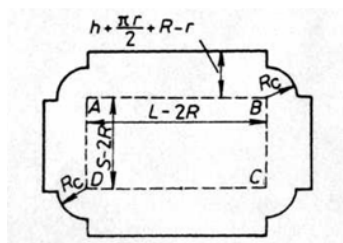


Obr. 5.3 Zobrazení přenosu rozměrů obdélníkového výtažku na teoretický válcový výtažek

Základní rozměry výtažku lze stanovit podle obr. 5.4. Obdélník určený body A, B, C, D představuje rovné dno výtažku. Prodloužením jeho stran nad těmito

body o hodnotu vypočtenou dle rovnice (5.1) byl získán základní tvar části, která je tvářena pouze ohýbáním.

$$x = h + \frac{\pi r}{2} + R - r \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

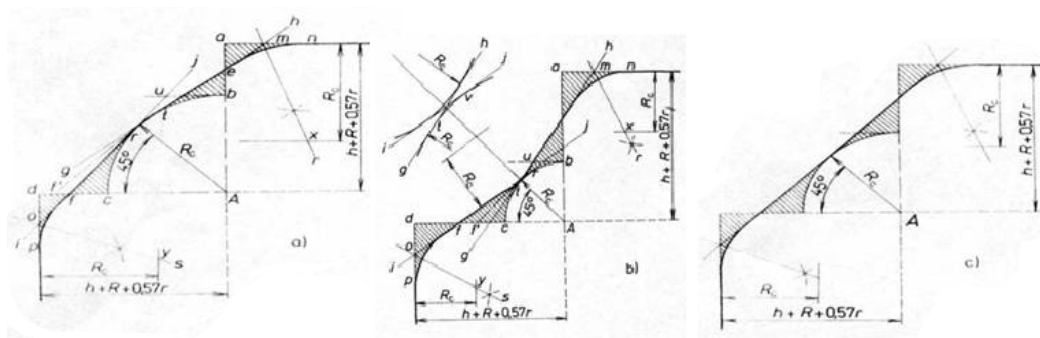


Obr. 5.4 Stanovení základních rozměrů pro teoretický tvar přístřihu s dostatečným množstvím materiálu

Pro výpočet poloměru kruhového přístřihu R_c potřebného k vytvoření rohových částí teoretického válcového výtažku byla použita rovnice (5.2).

$$R_c = \sqrt{2R \cdot h + R^2 + 1,14R \cdot r} \quad [\text{mm}] \quad (5.2)$$

Takto zkonstruovaný tvar přístřihu nelze použít a vzhledem k optimalizaci procesu tváření musí být provedeno zaoblení přechodů poloměrem dle obr. 5.5. V případě, že výrobek obsahuje přírubu, postupuje se stejně a při výpočtu poloměru R_c se tato skutečnost musí zohlednit.



Obr. 5.5 Konstrukce zaoblení přechodů rohu přístřihu u nerotačních výtažků

Podle vzájemného poměru hodnot R , r , h lze rozdělit výsledný tvar přístřihu:

- a) tvar vypouklý,
- b) tvar vydutý,
- c) tvar rovný.

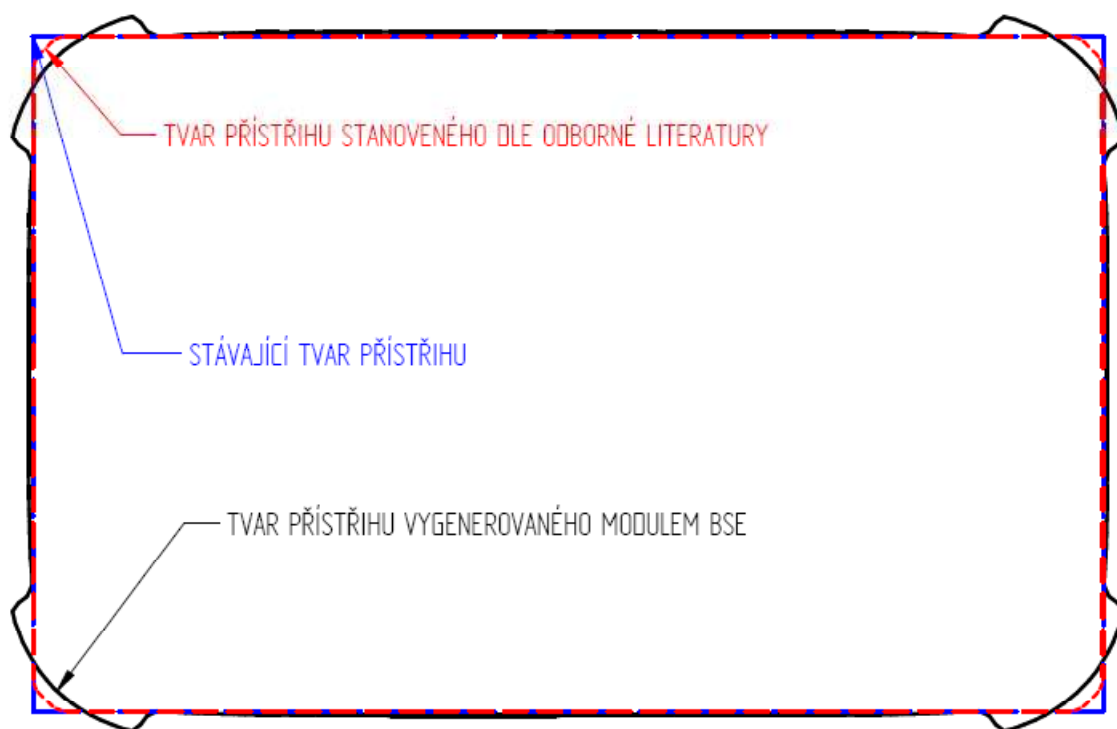
Výrobní výkres přístřihu pro výrobu postranice zkonstruovaného touto metodou je v příloze A2.3.

5.3 Porovnání přístřihů výtažku postranice stavebnicového odporníku

Pro simulaci tažení postranice stavebnicového odporníku byly použity tři přístřihy. Původní přístřih, přístřih stanovený podle metody zmiňované M. Tišňovským [10] a přístřih vygenerovaný s pomocí modulu „BSE“ programu DYNAFORM.

Vzhledem k jednoduchému odebírání výtažku z nástroje byl stanoven základní požadavek na zachování příruby v rohových částech polotovaru. Přebytečný materiál v rohu výtažku slouží, vzhledem ke konstrukci nástroje, k samovolnému uvolňování výtažku z pracovního prostoru tažného nástroje. Boční stěny postranice jsou zhotoveny v požadované toleranci během samotného tvářecího procesu.

Nejmenší plochu má přístřih stanovený podle M. Tišňovského, největší přístřih navržený modulem „BSE“. Jejich rozdíly jsou ale vzhledem k úspoře materiálu minimální. Grafické porovnání všech přístřihů je zobrazeno na obr. 5.6.



Obr. 5.6 Porovnání přístřihů použitých pro simulaci tažení
v programu DYNAFORM 5.2

6 Výpočet a simulace procesu tažení

Jednou z cest, kterými se moderní strojírenství ubírá je využívání moderních simulačních systémů, založených na metodě konečných prvků (dále jen „MKP“). MKP je přibližná numerická metoda řešení chování deformovaného materiálu vyžívající rovnicový popis daného případu. Hlavní myšlenkou metody je nahrazení spojitých oblastí výrobku s nekonečným počtem bodů jednodušším prostředím, zejména jednoduchými geometrickými útvary, jejichž počet je nám znám - konečný počet prvků.

Přes poměrně dlouhou dobu, po kterou je metoda známa, nebylo její praktické využití vhodné vzhledem k velké pracnosti při řešení soustav rovnic popisujících vzájemné vazby konečných prvků. S nástupem moderních informačních technologií došlo k razantnímu rozvoji nových matematických metod urychlujících výpočty. S vývojem specializovaných programů bylo umožněno výpočtové ověřování správnosti návrhu nástrojů a chování zvoleného materiálu. Podle zjištěných výsledků je možné provést konstrukční úpravy návrhu ještě dříve, než dojde k jeho reálné výrobě. MKP tak dává konstruktérovi možnost přímého ověření návrhu již ve stadiu jeho vzniku. Správné nasazení MKP tedy může pozitivně ovlivnit počet verzí prototypů a zkoušek, čas potřebný na vývoj výrobku a jeho cenu, úroveň a kvalitu.

Pro simulaci tažení postranice stavebnicového odporníku byl použit program DYNAFORM 5.2, který umožňuje simulaci hlubokého tažení plechů s možností nastavení a ověření návrhu tvářecích nástrojů. Tento program byl vyvinut společností Engineering Technology Associates, Inc. Systém je složen z několika modulů, které slouží pro zpracování importovaných dat. Modul „Preprocess“ je určen pro tvorbu a úpravu ploch, generování elementů a jejich kontrolu. Pro stanovení velikosti přístřihu a návrhu nástřihového plánu lze použít modul „BSE“ a pro práci s vlastními nástroji je vhodný modul „DFE“. Výsledky zpracované řešičem jsou vyhodnocovány pomocí modulu „ETA/Post-Processor“, který umožňuje přehrát simulaci celého procesu tažení.

6.1 Jednotlivé fáze MKP výpočtu

Pro potřeby simulace v programu DYNAFORM je nutné vytvořit modely použité pro tvorbu nástrojů a musí být stanoveny a respektovány všechny okrajové podmínky, mezi něž patří pohyb a dráha nástrojů, síla přidržovače, koeficient tření, materiálové vlastnosti použitého plechu a rozměr a tvar výchozího přístřihu.

6.1.1 Tvorba geometrického modelu

Výrobní dokumentace používaného tažidla i vyráběné postranice existuje pouze v papírové podobě. Pro potřeby simulace byly pomocí programu SOLID EDGE 3D vytvořeny modely tažníku, tažnice a vlastního výrobku postranice. 3D modely byly vytvářeny již s ohledem na hustotu sítě a proto byly vynechány geometrické tvary, jako jsou závlky, závlky, otvory či malé rádiusy, které jsou pro výpočet nevýznamné, protože by v konečném důsledku pouze zbytečně zvyšovaly velikost MKP modelu.

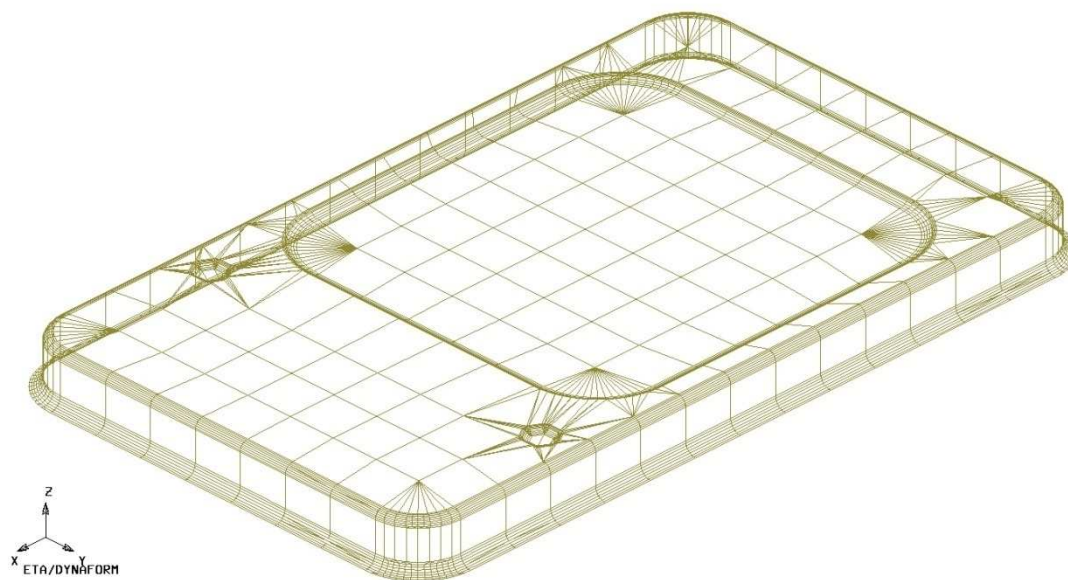
6.1.2 Tvorba sítě elementů v programu DYNAFORM

Do programu DYNAFORM byly postupně pomocí příkazu „Import“ vloženy modely představující tažník, tažnici a použitý přístřih, které byly vyjádřeny pouze čarami a plochami. Sít elementů byla vytvořena v programu DYNAFORM. Jednotlivé díly byly pojmenovány LOWTOOL (tažník), UPTOOL (tažnice) a BLANK (přístřih).

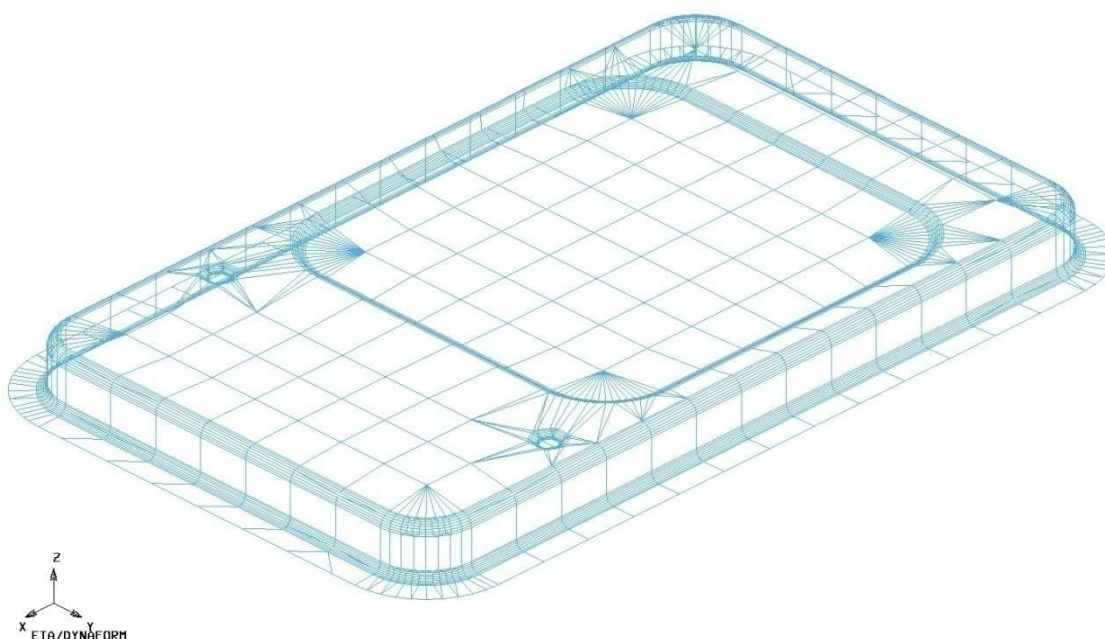
U tažníku (obr. 6.1) a tažnice (obr. 6.2) byla vytvořena sít elementů pomocí modulu „Preprocess“ s pomocí příkazu „Surface Mesh“. Pro vytvoření sítě elementů na nástrojích byl vybrán styl Tool Mesh. Maximální velikost elementů byla nastavena na hodnotu 30, minimální na hodnotu 0,5. Zadaná velikost elementů nástrojů neovlivňuje přesnost výsledků řešení, ale má vliv na konečný tvar výtazku.

Pro vytvoření sítě elementů na přístřihu (obr. 6.3) bylo použito příkazu „Define Blank“ z nástrojové nabídky „Tools“. Velikost elementů byla nastavena na hodnotu 6. Hustota sítě elementů u přístřihu silně ovlivňuje přesnost výsledků řešení a tím i čas potřebný k dokončení výpočtů.

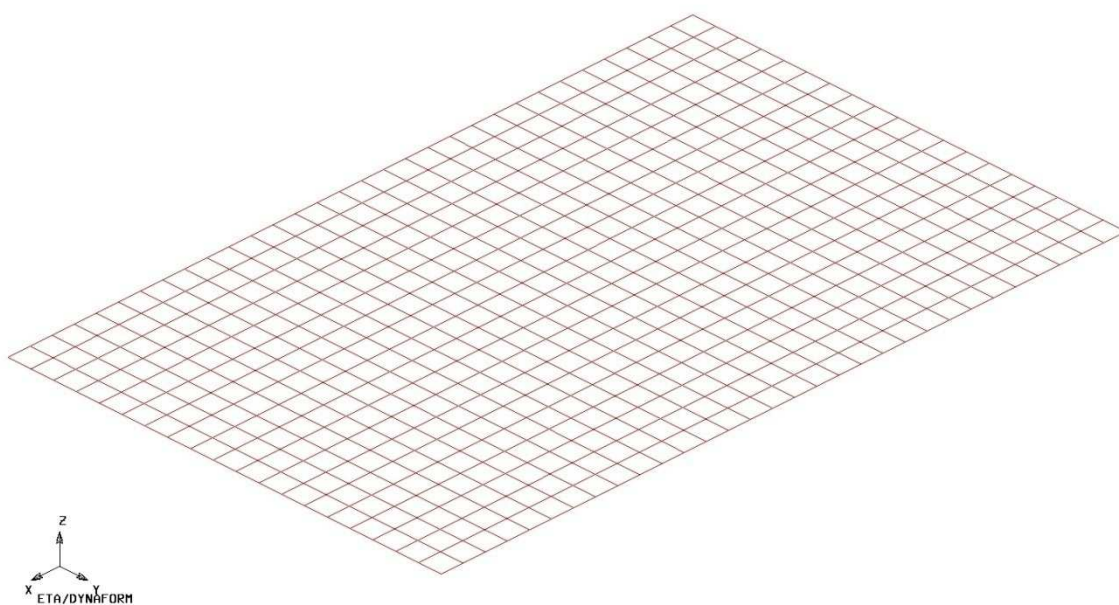
Díl přídržovače (obr. 6.4) byl vytvořen pomocí příkazu „Create“ a nazván LOWRING. Příkazem „Add...To Part“ byla do této součásti přesunuta vytvořená síť elementů z lemu tažníku a pomocí příkazu „Separate“ bylo provedeno uvolnění přídržovače a tažníku.



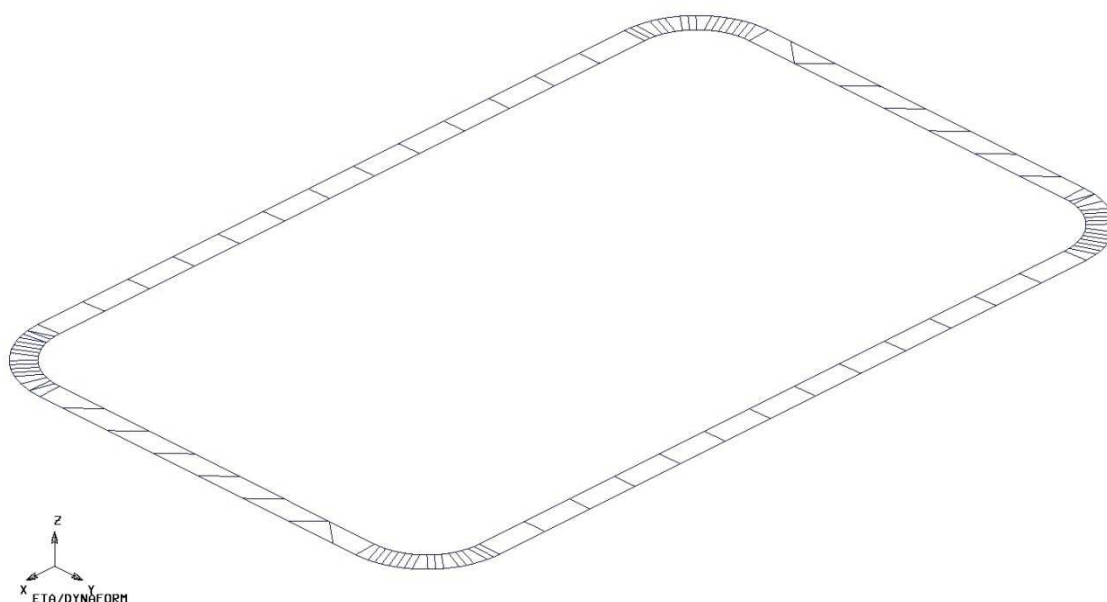
Obr. 6.1 Vytvořená síť elementů tažníku



Obr. 6.2 Vytvořená síť elementů tažnice



Obr. 6.3 Vytvořená síť elementů původního obdélníkového přístřihu



Obr. 6.4 Vytvořená síť elementů přídržovače

6.1.3 Definice okrajových podmínek

Mimo vytvořených nástrojů musí být pro potřeby simulace definovány všechny okrajové podmínky. Jsou to pohyb a dráha nástrojů, síla přidržovače, koeficient tření a materiálové vlastnosti použitého plechu.

Pomocí příkazu „Analysis setup“ z nástrojové nabídky „Tools“ byly nastaveny základní parametry, při kterých proběhla vlastní simulace tváření.

Nastavené parametry v nabídce „Analysis setup“

Jednotky („Units“):	MM, TON, SEC, N,
Typ tažení („Draw type“):	Single action (převrácený tah),
Kontaktní plocha („Contact Interface“):	Form One Way S. to S. (povrch nástrojů),
Směr zdvihu („Stroke Direction“):	Z,
Tažná mezera („Contact Gap“):	1,85 mm.

Nastavení atributů pro přístřih bylo provedeno použitím příkazu „Define Blank“. Jako přístřih byl nastaven vytvořený model pojmenovaný BLANK. Z knihovny materiálů byl vybrán nově nedefinovaný materiál DC01 Am. V nabídce „Property“ byla nastavena tloušťka plechu 1,5 mm.

Tab. 6.1 Zadané hodnoty pro materiál DC01 Am

Materiál DC01 Am	
Měrná hmotnost (Mass density)	7,83 kg·m ⁻³
Youngův modul pružnosti (Youngs modulus)	2,07·10 ⁵ MPa
Poissonova konstanta (Poissons ratio)	0,28 [—]
Model křivky zpevnění (Hardening rule)	2
Konstanta pevnosti (Material param P1 (C))	315 MPa
Průměrný exponent deformačního zpevnění (Material param P2 (n _m))	0,24 [—]
Materiálová konstanta (Exponent Face)	6
Součinitel plastické anizotropie 0° vůči směru válcování (Lankford param R00)	1,14 [—]
Součinitel plastické anizotropie 45° vůči směru válcování (Lankford param R45)	0,89 [—]
Součinitel plastické anizotropie 90° vůči směru válcování (Lankford param R90)	1,08 [—]

V dalším kroku byly k částem sestavy tažnice přiřazeny pomocí příkazu „Define Tools“ dříve vytvořené modely tažníku, tažnice a přidržovače.

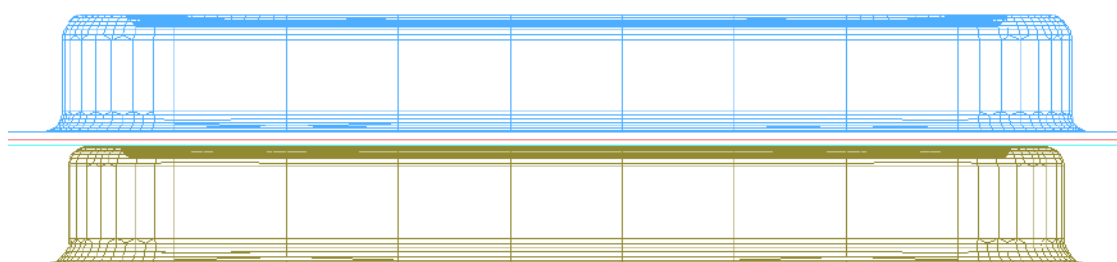
Tab. 6.2 Přiřazení nástrojů

Nástroje (TOOLS)	MODEL
Tažník (PUNCH)	LOWTOOL
Tažnice (DIE)	UPTOOL
Přidržovač (BINDER)	LOWRING

Pro nastavení nástroje do základní polohy (obr. 6.5) bylo využito příkazu „Auto Position“ z nabídky „Position Tool“. V případě převráceného tahu se jako hlavní nástroj volí přístřih BLANK.

Zadané hodnoty:

Hlavní nástroje („Master Tools – fixed“):	BLANK,
Deformované nástroje („Slave Tools“):	PUNCH, DIE, BINDER,
Směr pohybu nástroje („Direction“):	Z,
Tažná mezera („Contact Gap“):	1,85 mm.



Obr. 6.5 Výchozí pozice tažníku, tažnice, přidržovače a přístřihu

Všechny okrajové podmínky týkající se nástrojů byly definovány příkazem „Define Tools“ z nástrojové nabídky „Tools“. Rychlost tažení byla zvolena $14 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Touto rychlostí je prováděno tažení výtažku postranice dle technologického postupu. Hodnota zdvihu byla spočítána jako rozdíl minimální vzdálenosti mezi tažníkem a tažnicí a hodnoty tažné mezery. Zadané údaje pro tažník jsou uvedeny v tab. 6.3, pro tažnici v tab. 6.4 a pro přidržovač v tab. 6.5.

Tab. 6.3 Zadané hodnoty tažníku

Tažník (PUNCH)	
Stupně volnosti	Z
Typ kontaktu (Contact Type)	Forming_One_Way_S_S
Součinitel smykového tření (Static Friction)	0,125 [–]
Koeficient tlumení (Damping Coeff)	20 [–]
Tvar křivky pohybu (Curve Shape)	Trapezoidal
Začátek pohybu (Begin Time)	0 s
Rychlost pohybu (Velocity)	$14 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Zdvih (Stroke Dist)	31,85

Tab. 6.4 Zadané hodnoty tažnice

Tažnice (DIE)	
Typ kontaktu (Contact Type)	Forming_One_Way_S_S
Součinitel smykového tření (Static Friction)	0,125 [–]
Koeficient tlumení (Damping Coeff)	20 [–]

Tab. 6.5 Zadané hodnoty přidržovače

Přidržovač (BINDER)	
Typ kontaktu (Contact Type)	Forming_One_Way_S_S
Součinitel smykového tření (Static Friction)	0,125 [–]
Koeficient tlumení (Damping Coeff)	20 [–]
Začátek pohybu (Begin Time)	0 s
Síla přidržovače (Force)	dle výpočtu

Sílu přidržovače je potřeba určit pro každý přístřih zvlášť ze vztahu:

$$F_p = p_p \cdot S_p \quad [\text{mm}] \quad (6.1)$$

kde jsou p_p – měrný tlak přidržovače [MPa],

S_p – účinná plocha přidržovače [mm].

Účinná plocha přidržovače byla pro jednotlivé přístřihy stanovena pomocí funkce programu SOLID EDGE – kontrola plochy. Měrný tlak přidržovače byl zvolen dle doporučení odborné literatury 2 MPa [6].

Tab. 6.6 Přidržovací síly pro jednotlivé přístřihy

Přístřihy	Plocha přístřihu S [mm ²]	Účinná plocha přidržovače S_p [mm ²]	Měrný tlak p_p [MPa]	Přidržovací síla F_p [N]
BSE modul	154 200,0	26 451,5	2,0	52 903,0
Stávající přístřih	151 900,0	24 151,5	2,0	48 303,0
Návrh dle literatury	151 255,0	23 506,5	2,0	47 013,0

Před nastavením parametrů v dialogovém okně „Analysis“ potřebných pro výpočet simulace byla provedena kontrola nastavení a pohybu nástrojů pomocí příkazů „Summary“ a „Animate“ z nástrojové nabídky „Tool“. Zvolené nastavení bylo uloženo pro potřeby řešiče LS-DYNA do datového souboru s příponou dyn.

6.2 Provedení vlastního výpočtu pomocí řešiče LS-DYNA

Pro provedení výpočtu bylo využito programu LS-DYNA Jobs Submitter 2.2, který je součástí programového balíčku DYNAFORM. Připravené datové soubory byly zařazeny do seznamu zakázek programu pomocí tlačítka „Add Dyn Jobs“. U všech souborů byla nastavena jednoduchá přesnost výpočtu („Single Precision“) a zadány kontrolní parametry („Control Parameter“).

Po spuštění řešiče („Submit Jobs“) bylo zobrazeno systémové okno ukazující průběžný stav a předpokládaný čas dokončení řešení. Tato hodnota není přesná, ale pouze odhadovaná. Je závislá na počtu kroků, velikosti vytvořené mřížky a rychlosti procesoru počítače.

6.3 Zpracování výsledků simulace

Výsledky simulace uložené v souborech d3plot a dynain byly podrobeny analýze v programu ETA/Post-Processor 1.0. Soubor d3plot obsahuje kromě nezměněných dat modelu veškeré informace o průběhu simulace tažení vytvořené řešičem LS-DYNA. Soubor dynain je generován na konci simulace a obsahuje informace o polotovaru. V nabídce programu ETA/Post-Processor je celá řada analýz, podle kterých je možno výtažek hodnotit.

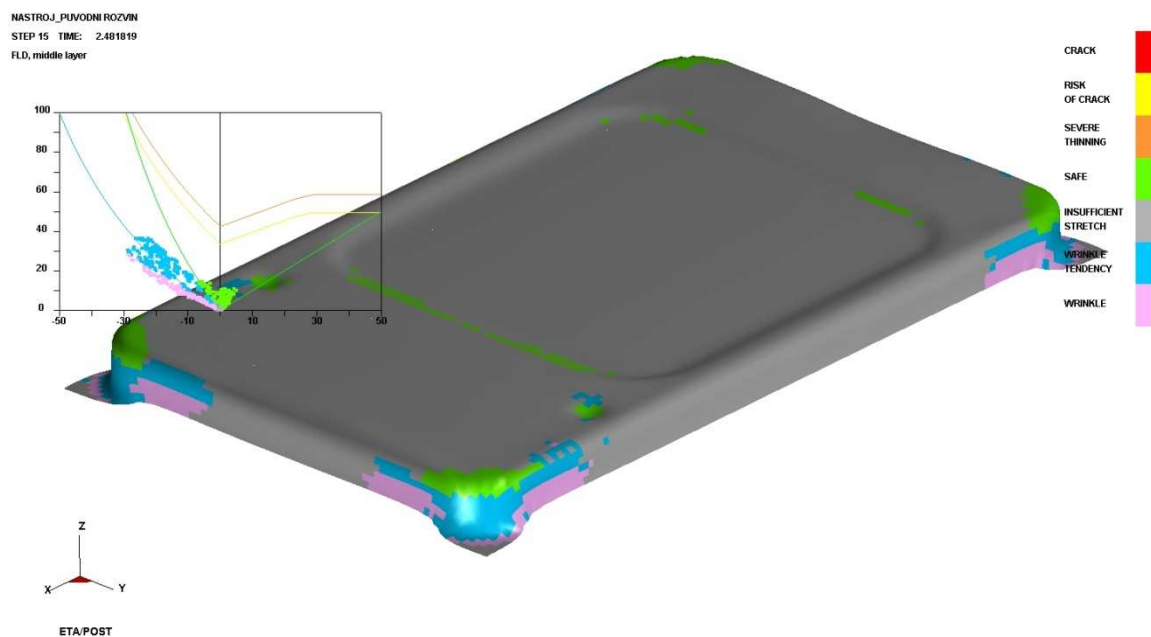
Pro hodnocení výtažku postranice byly zvoleny tyto analýzy:

- a) „Forming Limit Diagram“ – analýza s využitím diagramu mezních deformací,
- b) „Norm Strain“ – analýza normálová deformace,
- c) „Thickness“ – analýza tloušťky materiálu po tažení,
- d) „Thinning“ – analýza ztenčení materiálu po tažení,
- e) „Edge Movement“ – analýza pohybu okraje přístřihu při tažení.

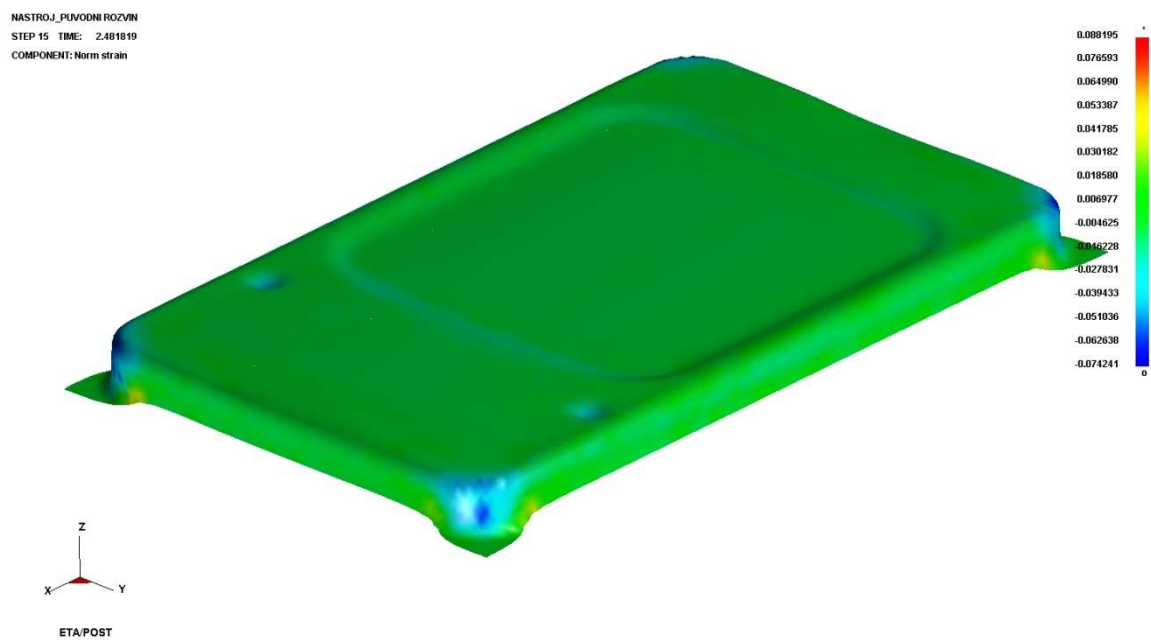
7 Výsledky simulace procesu tažení

U každého přístřihu byly, vzhledem k možnému porovnání výsledků, provedeny tytéž analýzy a jejich výsledky byly rozděleny do jednotlivých kapitol.

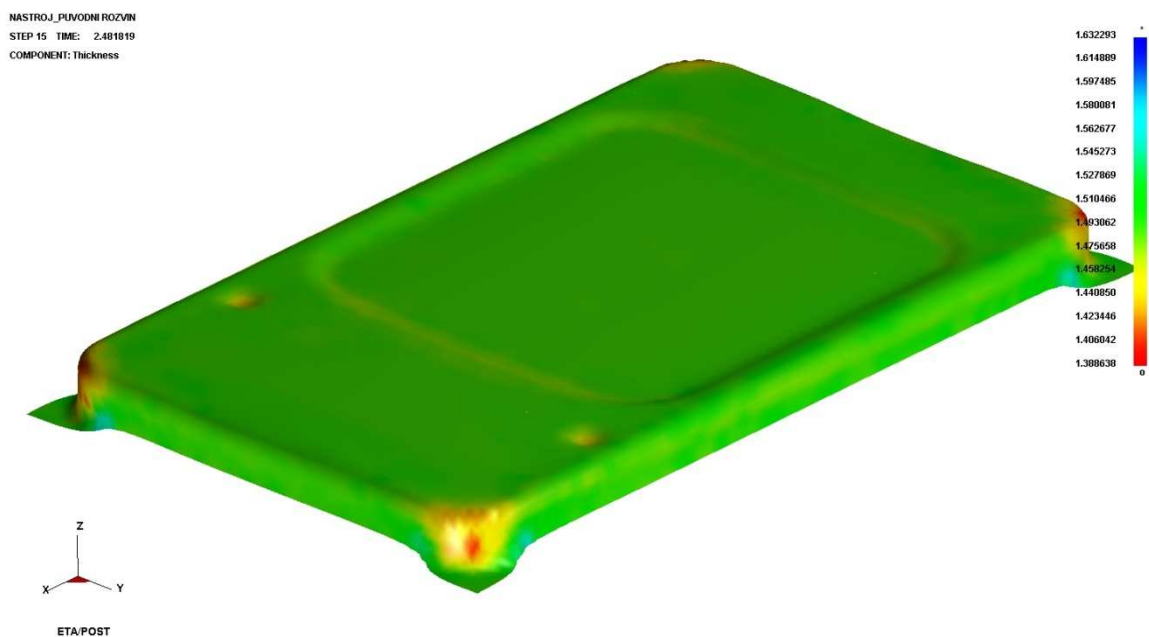
7.1 Simulace tažení postranice stavebnicového odporníku ze stávajícího přístřihu



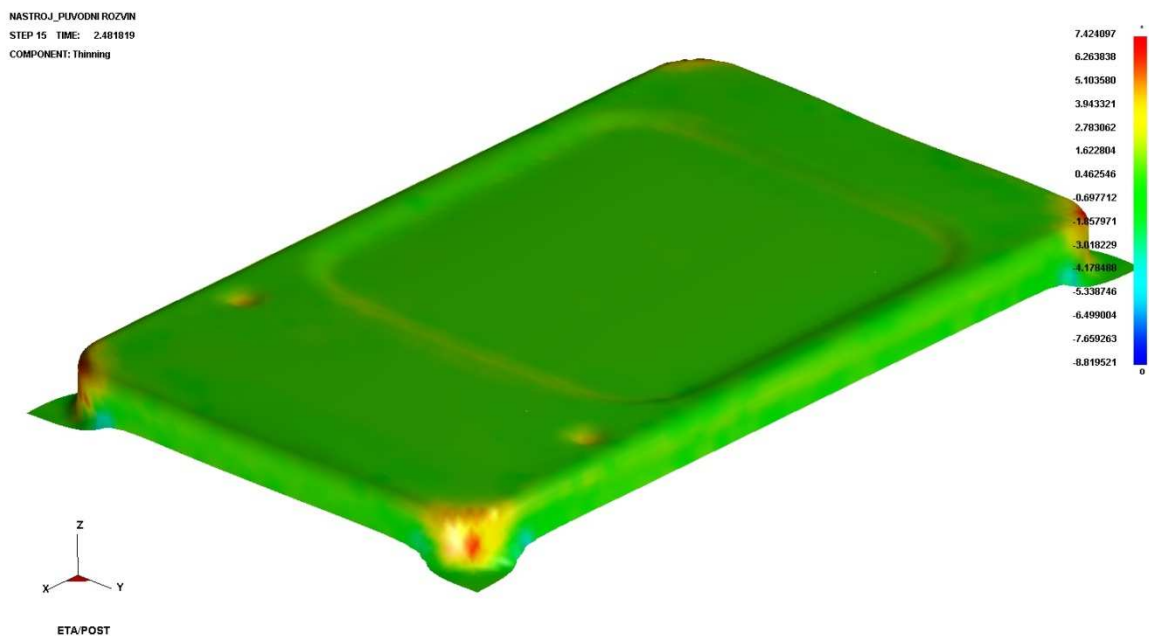
Obr. 7.1 Analýza výtažku ze stávajícího přístřihu s využitím diagramu mezních deformací



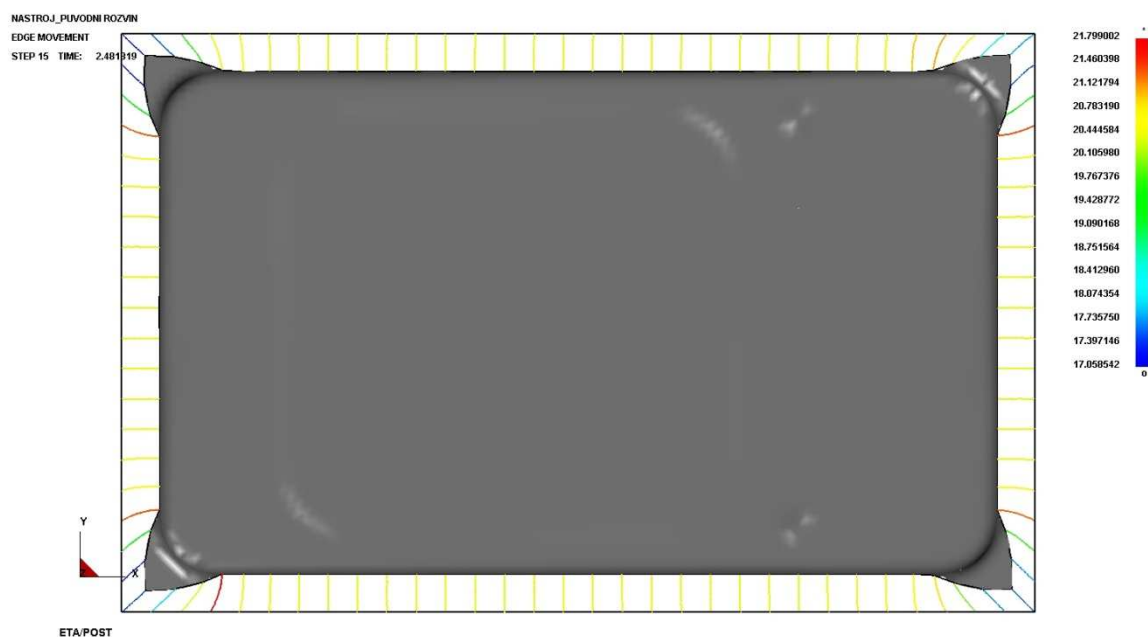
Obr. 7.2 Analýza normálové deformace výtažku taženého ze stávajícího přístřihu



Obr. 7.3 Analýza tloušťky výtažku taženého ze stávajícího přístřihu

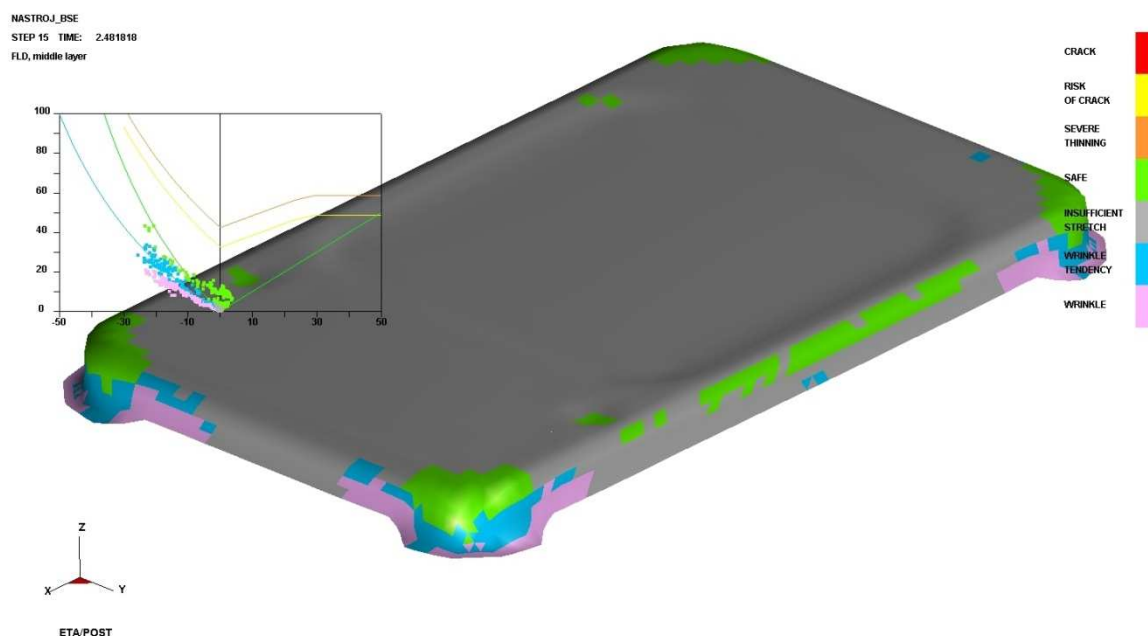


Obr. 7.4 Analýza ztenčení výtažku taženého ze stávajícího přístřihu

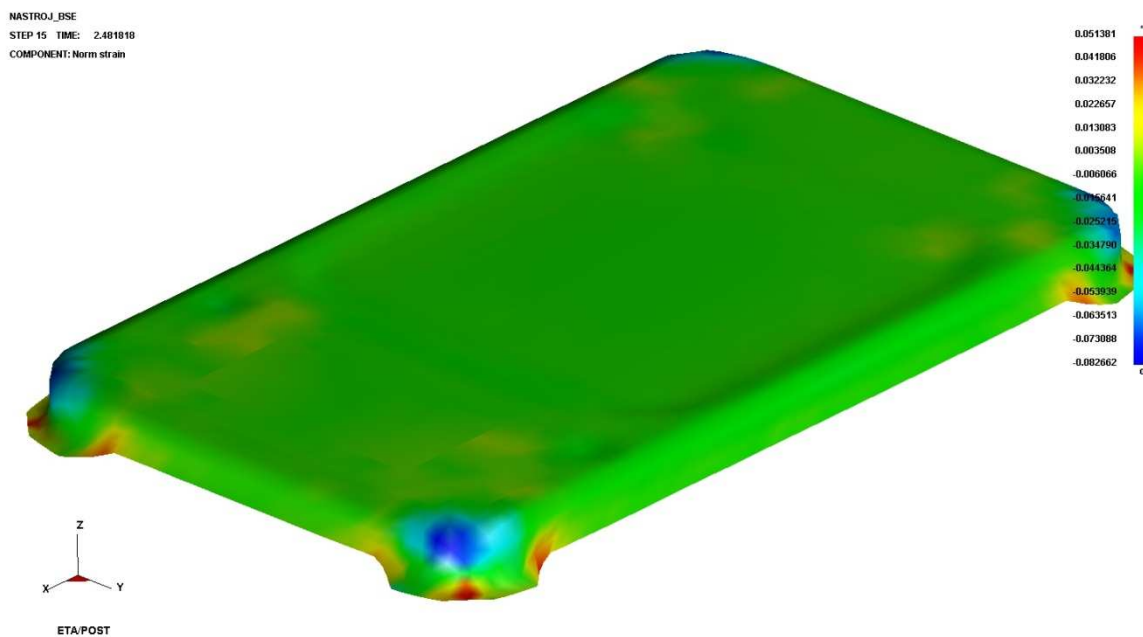


Obr. 7.5 Analýza pohybu okraje přístřihu taženého ze stávajícího přístřihu

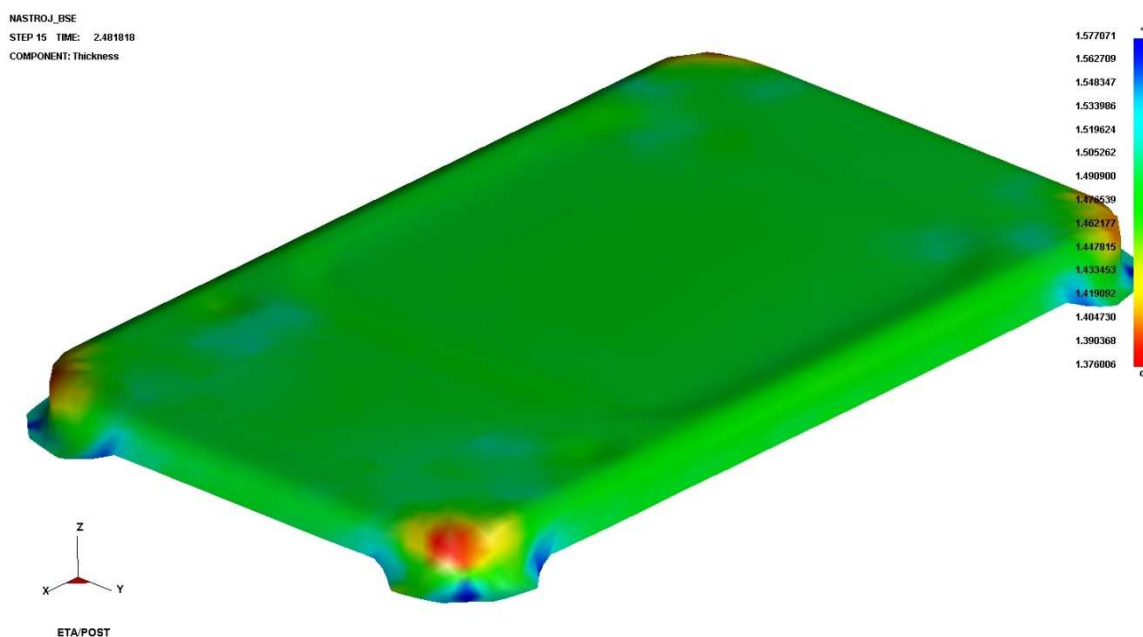
7.2 Simulace tažení postranice stavebnicového odporníku z přístřihu navrženého pomocí modulu BSE



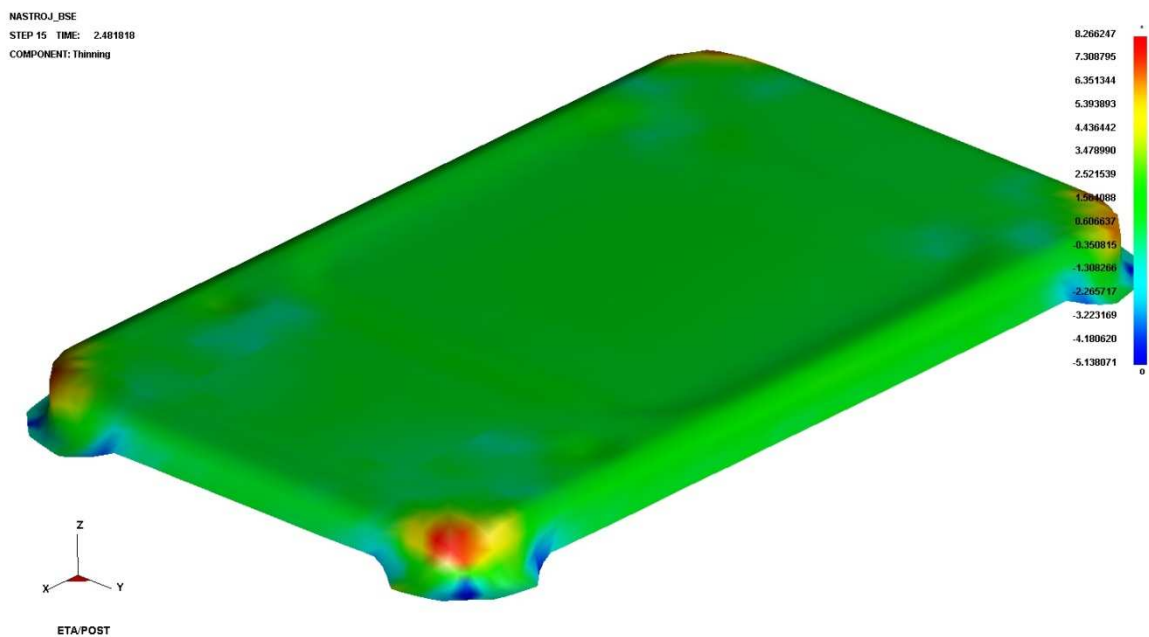
Obr. 7.6 Analýza výtazku z přístřihu navrženého modulem BSE s využitím diagramu mezních deformací



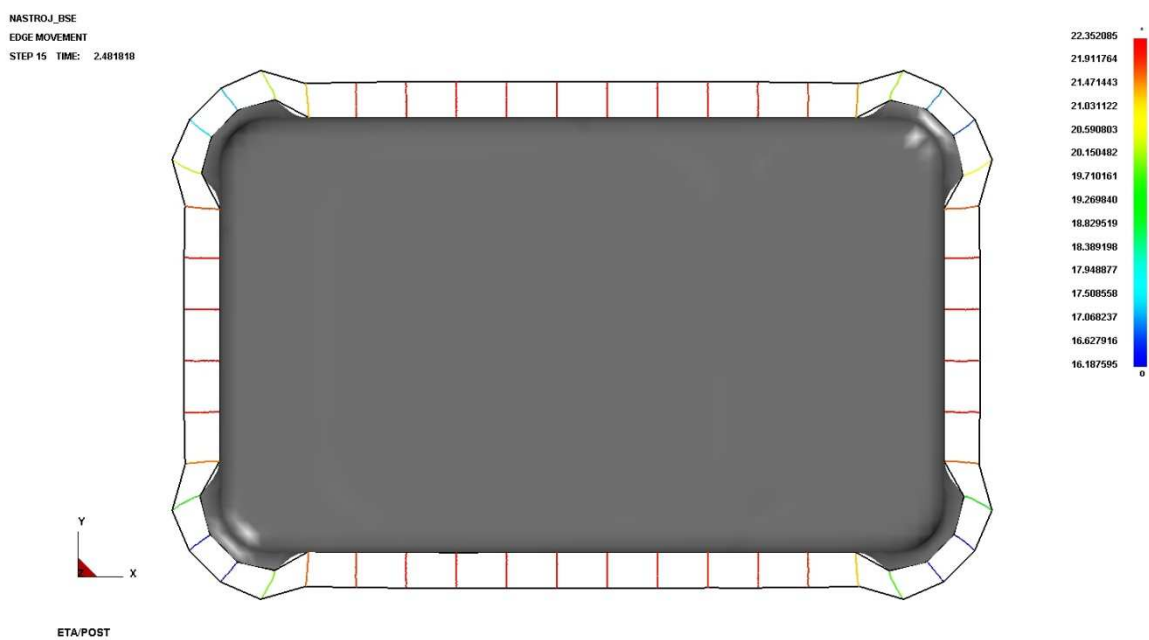
Obr. 7.7 Analýza normálové deformace výtažku taženého
z přístřihu navrženého modulem BSE



Obr. 7.8 Analýza tloušťky výtažku taženého z přístřihu
navrženého modulem BSE

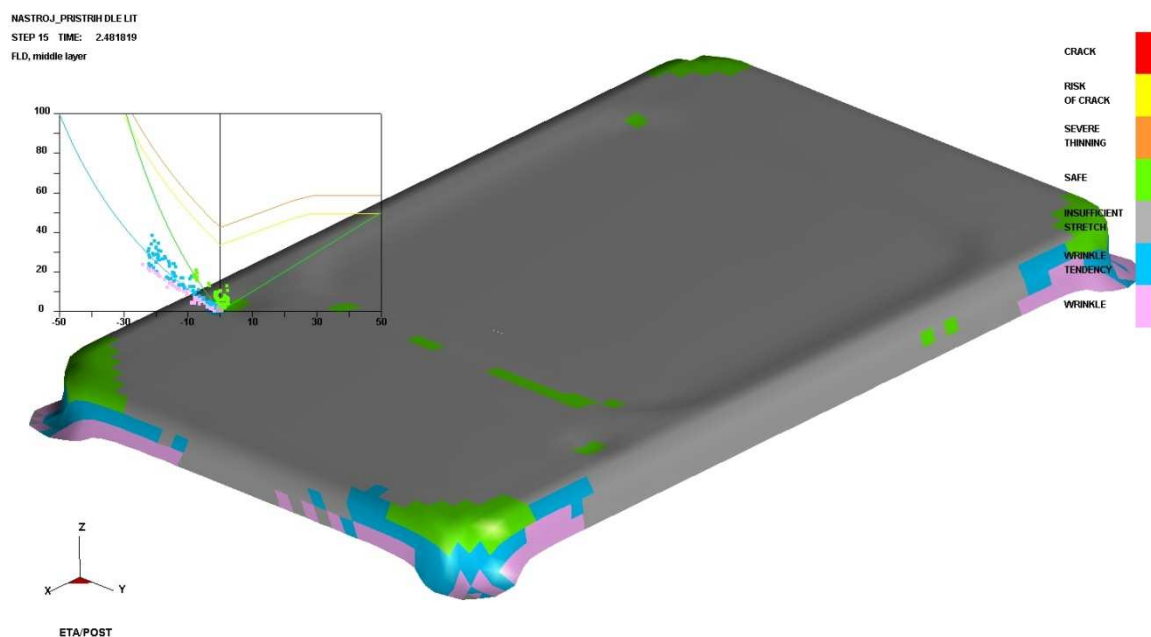


Obr. 7.9 Analýza ztenčení výtažku taženého z přístřihu
navrženého modulem BSE

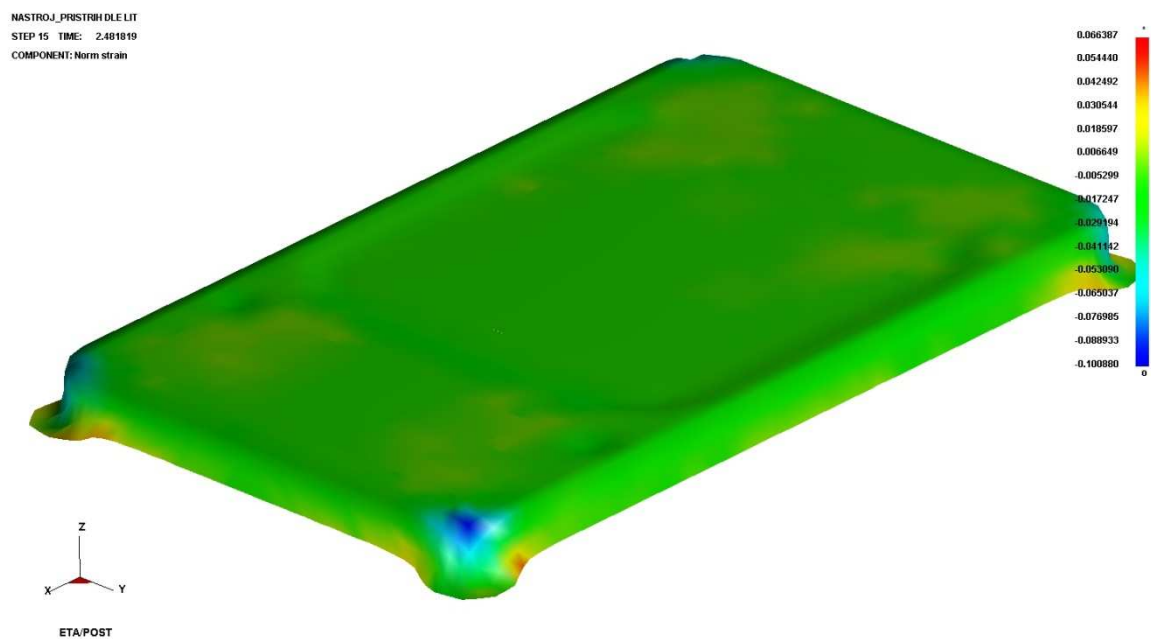


Obr. 7.10 Analýza pohybu okraje přístřihu navrženého modulem BSE

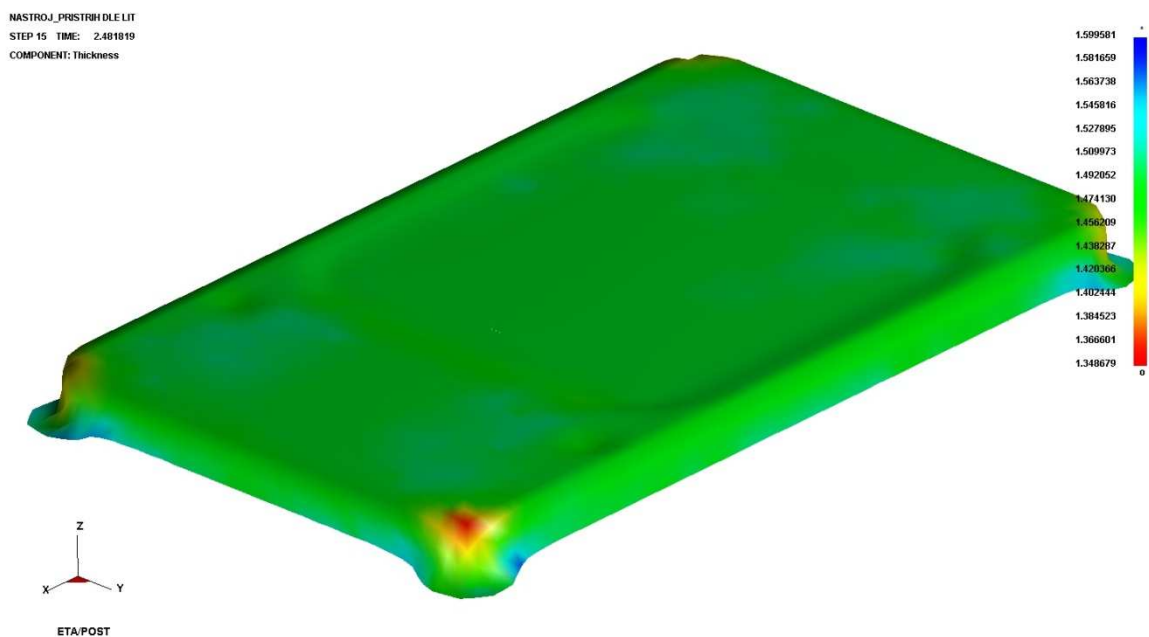
7.3 Simulace tažení postranice stavebnicového odporníku z přístřihu navrženého podle metody zmiňované M. Tišňovským [10]



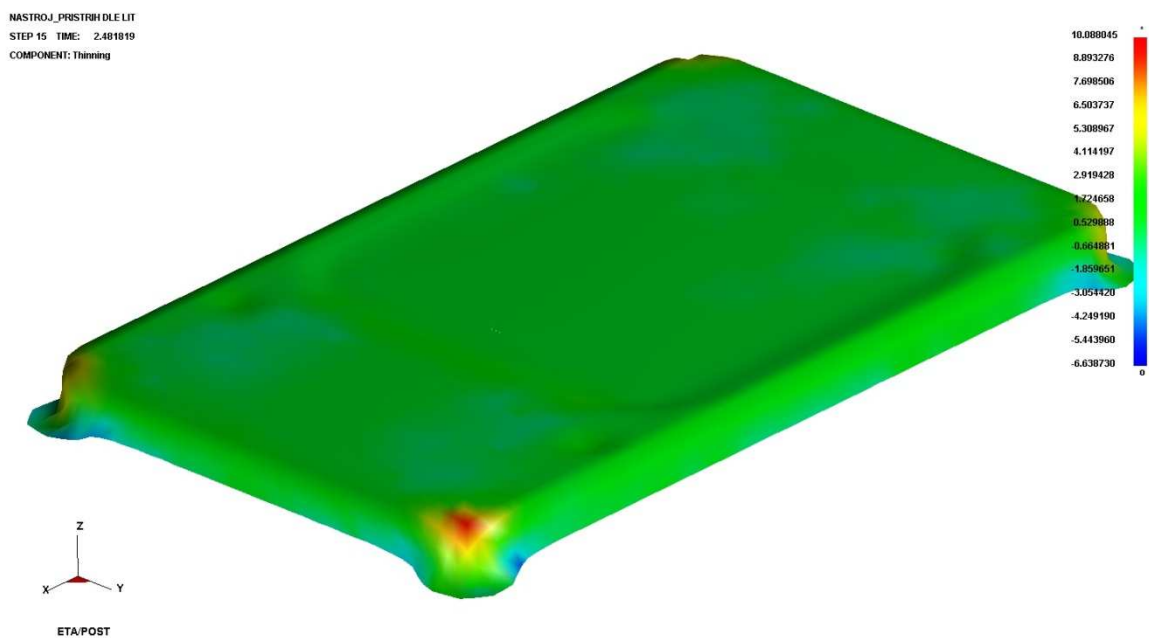
Obr. 7.11 Analýza výtažku z přístřihu navrženého podle metody zmiňované M. Tišňovským s využitím diagramu mezních deformací



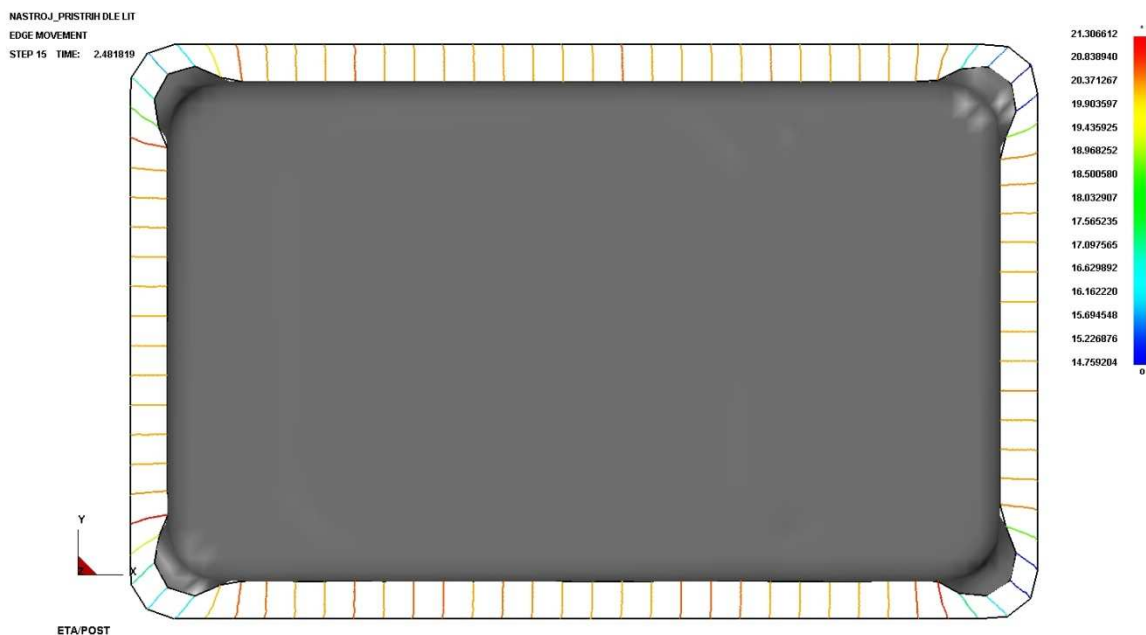
Obr. 7.12 Analýza normálové deformace výtažku taženého z přístřihu navrženého podle metody zmiňované M. Tišňovským



Obr. 7.13 Analýza tloušťky výtažku taženého z přístříhu
navrženého podle metody zmiňované M. Tišnovským



Obr. 7.14 Analýza ztenčení výtažku taženého z přístříhu
navrženého podle metody zmiňované M. Tišnovským



Obr. 7.15 Analýza pohybu okraje přístřihu navrženého podle metody zmiňované M. Tišňovským

7.4 Zhodnocení výsledků simulace tažení postranice stavebnicového odporníku

Výtažky byly mezi sebou porovnány v programu ETA/Post-Processor s pomocí analýzy znázorněných deformací výtažku v diagramu mezních deformací, analýzy normálové deformace, analýzy tloušťky a ztenčení materiálu a analýzy pohybu okraje přístřihu.

Pro posouzení stavu výtažku po tváření byla jako hlavní nástroj zvolena analýza mezního tvářecího diagramu (obr. 7.1, obr. 7.6 a obr. 7.11), ve kterém jsou jasně vyznačena problémová místa. Tato analýza ukazuje na ploše výtažku celkem sedm různých oblastí tvářitelnosti. Bezpečná místa (SAFE) jsou znázorněna zelenou, místa náchylná ke zvlnění (WRINKLE) fialovou a případné defekty (CRACK) jsou označeny červenou barvou. Výsledky všech tří simulací nebyly příliš rozdílné. Ani v jednom případě nebyl prokázán vznik prasklin. Výtažek vyrobený z původního přístřihu vykazoval nejrozsáhlejší plochy možného výskytu zvlnění.

Vyhodnocení průběhu normálové deformace je zobrazeno na obr. 7.1, obr. 7.6 a obr. 7.11. Maximální hodnoty je dosaženo u všech použitých polotovarů v místech

přechodu příruby do bočních stěn. Nejvyšší hodnotu normálové deformace 0,088 vykazuje výtažek z původního přístřihu (obr. 7.1).

Na většině ploch výtažků se pohybuje tloušťka materiálu okolo 1,5 mm. Největší ztenčení se projevilo v rozích výrobku, ale ani toto není příliš markantní a nedosahuje kritických hodnot. Celkové rozmezí tloušťky je u přístřihu stanoveného s využitím modulu BSE (obr. 7.8) $1,376 \text{ mm} \div 1,577 \text{ mm}$, u přístřihu navrženého podle M. Tišňovského (obr. 7.13) $1,349 \text{ mm} \div 1,599 \text{ mm}$ a u původního přístřihu (obr. 7.3) $1,389 \text{ mm} \div 1,632 \text{ mm}$.

Pomocí analýzy pohybu přístřihu v tvářecím nástroji („Edge Movement“) lze popsat proces, který probíhá při samotném tváření. Pomocí této analýzy je možno zjistit, jakou vzdálenost urazí během tváření okraj přístřihu.

U výtažku taženého ze stávajícího přístřihu (obr. 7.5) se vzdálenost, kterou musí okraj přístřihu urazit, pohybuje v rozmezí $17,05 \text{ mm} \div 21,80 \text{ mm}$. K největšímu vtahování materiálu dochází v místě přechodu bočních stěn do lemu výtažku. Výsledky analýzy pohybu okraje přístřihu navrženého podle metody zmiňované M. Tišňovským (obr. 7.15) jsou obdobné. Největší pohyb materiálu se projevuje v místech přechodů bočních stěn do lemu, kde dosahuje hodnoty 21,30 mm. U výtažku taženého z přístřihu navrženého modulem BSE (obr. 7.10) dochází k největšímu přemístění materiálu v bočních stěnách, kde okraj přístřihu musí urazit vzdálenost 22,35 mm.

8 Stručný ekonomický rozbor a racionalizace stávající technologie výroby výtažku postranice stavebnicového odporníku

Byl stanoven primární úkol s ohledem na zlepšení kvality výroby výtažku postranice stavebnicového odporníku. Pro jeho nastartování a další plnění byla provedena sada zkoušek vyšetřujících mechanické vlastnosti používaného materiálu DC01 Am. Šlo o zkoušku tahem (viz 3.2) a hloubením dle Erichsena (viz 3.3). Dále byla pro hodnocení tvářitelnosti materiálu využita nekonvenční kritéria tvářitelnosti plechu (viz 3.4, 3.5, 3.6). Tato měření prokázala správnost výběru materiálu a jeho vhodnost pro danou aplikaci. Také z výsledků provedených analýz znázornění deformací výtažku v diagramu mezních deformací, analýz normálových deformací, analýz tloušťky a ztenčení materiálu a analýzy pohybu okraje přístřihu (viz 7.4) je patrné, že používaný ocelový plech DC01 Am není v kritických místech výtažku náchylný na vznik prasklin.

Ze simulace stávajícího tvářecího procesu vyplynul důležitý fakt, že pro kvalitní provedení výtažku není potřeba měnit stávající technologii výroby. Hlavní vliv na vznik zmetkovitosti výroby výtažku postranice stavebnicového odporníku má podle mého předpokladu nedodržování technologické kázně obsluhou tvářecího lisu. Zejména je třeba klást důraz na pečlivost provádění mazání přístřihu. Používané mazivo Shell Fenella D 601 je na přístřih nanášeno štětcem z přenosné příruční nádoby. Znečištěním používaného štětce dochází ke znehodnocení vlastního maziva. Je třeba dbát, aby nanesená vrstva maziva byla souvislá ve sledovaných místech výtažku. Pokud se mazivo nedostane do kritických míst výtažku, dochází vlivem nadměrného tření ke zvýšení radiálního napětí a tím k praskání výtažku. Důslednější kontrolou tvářecího procesu, správným používáním předepsaného maziva a důsledným čištěním pracovního prostoru nástroje by mělo dojít ve výrobě ke snížení procenta zmetkovitosti u sledovaného výtažku postranice stavebnicového odporníku.

Jedním ze směrů vedoucích ke snížení prvotních nákladů na výrobu postranice stavebnicového odporníku by bylo snížení počtu výrobních operací. Navržení vhodného tvaru a velikosti přístřihu, jehož tažením nevzniká příruba v rohových částech výtažku, by vedlo k vynechání operace ostřížení sloužící k odstranění tohoto přebytečného materiálu.

V případě změny technologie výroby postranice stavebnicového odporníku, který by využíval nový druh přístřihu, by se musel zhotovit nový střižný nástroj. Dále by muselo dojít k úpravě samotného tvářecího nástroje s ohledem na odebírání výtažků po provedení tvářecí operace. U této alternativní technologie je nutné počítat s vysokými pořizovacími náklady. Z ekonomického hlediska je toto nerentabilní. Uspořený podíl nákladů pro výrobu postranice stavebnicového odporníku při odstranění výše jmenované operace převyší, vzhledem k malé výrobní dávce (2 500 ks ročně), náklady potřebné pro zavedení nové výrobní technologie do praxe.

Po dosazení do vzorce (8.1) byla vyjádřena roční spotřeba plechu DC01 Am pro stávající technologii výroby výtažku postranice stavebnicového odporníku:

$$p = \frac{Q}{n_p} \quad [\text{ks}] \quad (8.1)$$

kde jsou p – počet tabulí plechu potřebných na roční výrobu výtažku postranice stavebnicového odporníku [ks],

Q – počet výtažků postranice vyrobených za jeden rok [ks],

n_p – počet přístřihů získaných z jedné tabule plechu [ks].

Po dosazení do vzorce (8.1) byla vyjádřena roční spotřeba plechu DC01 Am pro stávající technologii výroby výtažku postranice stavebnicového odporníku:

$$p = \frac{Q}{n_p} = \frac{2500}{12} = 208,33 \Rightarrow 209 \text{ ks}$$

Do výpočtů je vhodné zahrnout určité procento zmetkovitosti, které provází výrobu výtažku postranice stavebnicového odporníku. Roční spotřebu plechu s uvažovaným koeficientem zmetkovitosti lze vypočítat dle vztahu:

$$p = \frac{Q \cdot \left(1 + \frac{z_{st}}{100}\right)}{n_p} \quad [\text{ks}] \quad (8.2)$$

kde jsou p – stávající roční spotřeba tabulí plechu potřebná pro roční výrobu 2500 ks výtažků postranice stavebnicového odporníku [ks],

Q – celkový počet výtažků postranice stavebnicového odporníku vyrobených za rok [ks],

n_p – počet přístřihů získaných z jedné tabule plechu [ks],

z – zmetkovitost při výrobě výtažku postranice stavebnicového odporníku [%].

Pro porovnání spotřeby plechu DC01 Am při stávající zmetkovitosti 8 % a pro zlepšení na předpokládanou zmetkovitost 2 %, kterého by se zavedením opatření potlačujícího výskyt vadných výtažků postranice stavebnicového odporníku při jeho výrobě mělo dosáhnout, bylo využito výpočtu dle vzorce (8.2):

$$p_{8\%} = \frac{Q \cdot (1 + \frac{z}{100})}{n_p} = \frac{2500 \cdot (1 + \frac{8}{100})}{12} = 225 \text{ ks}$$

$$p_{2\%} = \frac{Q \cdot (1 + \frac{z}{100})}{n_p} = \frac{2500 \cdot (1 + \frac{2}{100})}{12} = 212,5 \text{ ks} \Rightarrow 213 \text{ ks}$$

Z výpočtů skutečné a předpokládané spotřeby tabulí plechu vypočítané pro 2500 ks výtažků postranice stavebnicového odporníku vyplývá, že snížením zmetkovitosti na úroveň 2 % se ročně ušetří 12 ks tabulí plechu DC01 Am o rozměru 1,50 mm × 2000 mm × 1000 mm, což činí při ceně 420,- Kč za jednu tabuli plechu roční úsporu 5 040,- Kč.

9 Závěr

Z výsledků bakalářské práce „*Návrh technologie výroby výtažku z plechu s využitím MKP*“ vyplývají tyto závěry:

- a) Pro určení mechanických vlastností použitého materiálu DC01 Am byla využita zkouška tahem (viz 3.2). Tato prokázala, že zjištěné hodnoty tažnosti A_{80} , smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a pevnosti v tahu R_m (viz tab. 3.4) odpovídají hodnotám předepsaným v ČSN EN 10130+A1 (viz tab. 3.3).
- b) Ke zjištění střední hodnoty prohloubení \overline{IE} byla realizována napodobující zkouška – zkouška hloubením dle Erichsena (viz 3.3). Zjištěná střední hodnota prohloubení dle Erichsena $\overline{IE} = 10$ mm (viz tab. 3.5) je vyšší než mezní hodnota $IE = 10,2$ mm uvedená v normě ČSN 41 1321.
- c) Pro hodnocení tvářitelnosti materiálu byla využita nekonvenční kritéria (viz 4). Byly vypočítány hodnoty součinitelů plošné anizotropie a maximálních hodnot součinitelů plošné anizotropie (viz 3.4, tab. 3.6, tab. 3.7). Byly vypočteny hodnoty součinitelů plastické anizotropie r_x (viz 3.5, tab. 3.9) a exponentů deformačního zpevnění n_x (viz 3.6, tab. 3.10) ve směrech 0° , 45° , 90° vůči směru válcování plechu. Dále byl vypočten vážený průměr součinitele plastické anizotropie $\bar{r} = 1,00$, podle kterého lze materiál DC01 Am zatřídit pro hodnocení tah – tlak mezi materiály s uspokojivou tvářitelností a průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění $n_m = 0,24$, podle kterého lze tento materiál pro hodnocení tah – tah zatřídit mezi materiály vykazující dobrou tvářitelnost.
- d) Pro výtažek postranice stavebnicového odporníku byly ke stávajícímu přístřihu navrženy další varianty přístřihů (viz 5.2), jednak přístřih sestrojený pomocí modulu BSE v programu DYNAFORM 5.2 (viz příloha A2.2) a jednak přístřih navržený dle odborné literatury (viz příloha A2.3). Rozdíl mezi použitými přístřihy je z hlediska úspory materiálu zanedbatelný, a to v rozmezí 2 % (viz obr. 5.5).

- e) Z výsledků simulací v programu DYNAFORM 5.2 provedených analýz znázornění deformací výtažku v diagramu mezních deformací, analýz normálových deformací, analýz tloušťky a ztenčení materiálu a analýz pohybů okraje přístřihu (viz 7.4) provedených simulací jasně vyplynulo, že není potřebné přistupovat ke změně technologie výroby a volbě jiného materiálu. Příčinou vzniku prasklin může být menší radiální napětí, vznikající nedostatečným mazáním v rozích výtažku postranice stavebnicového odporníku. Důsledným dodržováním předepsaného technologického postupu by mělo dojít ve výrobě ke snížení procenta zmetkovitosti u sledovaného výtažku postranice stavebnicového odporníku.
- f) Při změně technologie výroby výtažku postranice stavebnicového odporníku, který by využíval nový tvar a velikost přístřihu, jehož tažením by nevznikala příruba v rohových částech výtažku, by došlo k výraznému zvýšení nákladů. Vzhledem k malému ročnímu objemu vyráběných kusů by se tyto vzrostlé náklady podílely na nárůstu ceny finálního produktu.

10 Použité zdroje

- [1] ČADA, R. *Tvářitelnost materiálu a nekonvenční metody tváření, plošná tvářitelnost (návody do cvičení) : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TUO, 2002, 148 s. ISBN 80-248-0019-5.
- [2] STRÁNSKÝ, L., MOLLIKOVÁ, E. a SEDLÁČEK, J. *Zkouška tahem – Studijní opora předmětu Nauka o materiálu*. Brno : VUT, 2002, 23 s.
- [3] ČADA, R. *Tvářitelnost ocelových plechů : odborná knižní monografie*. 1. vyd. Ostrava : REPRONIS, 2001. 346 s. ISBN 80-86112-77-8.
- [4] MEP Postřelmov, a. s. *MEP Postřelmov*[online]. c 2009 [cit. 2010-02-25]. Dostupné z URL: <<http://www.mep.cz/>>.
- [5] BAREŠ, K. a kol. *Lisování*. 1. vyd. Praha : SNT – Nakladatelství technické literatury Praha, 1971. 552 s. ISBN 04-234-71.
- [6] ČADA, R. *Technologie – část tváření a slévání (návody do cvičení) : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TUO, 2000. 188 s. ISBN 80-7078-540-3.
- [7] ETA, Inc. *Eta/DYNAFORM User's manual*. Version 5.2 Michigan : ETA, Inc., 2004. 360 s.
- [8] ETA, Inc. *Eta/Post User's manual*. Version 1.0 Michigan : ETA, Inc., 2004. 127 s.
- [9] PETRUŽELKA, J. a SONNEK, P. *Tvařitelnost kovových materiálů*. [Upravená verze 12/2009.] Ostrava : VŠB-TUO, 2009. 228 s.
- [10] TIŠNOVSKÝ, M. a MÁDLE, L. *Hluboké tažení plechu na lisech*. Nakladatelství technické literatury Praha, 1990. 200 s. ISBN 04-212-90
- [11] ELFMARK, J. *Tváření kovových materiálů : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TUO, 2000. 188 s. ISBN 80-7078-042-8.
- [12] RUSZ, S. *Tváření – část I : skriptum*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TUO, 2003. 156 s. ISBN 80-248-0340-2.

11 Seznam příloh

str.

A1 Přílohy týkající se použitého materiálu a popisu výroby postranice

A1.1 – Atest dodaného materiálu DC01 Am	66
A1.2 – Hydraulický lis VEB 1600	67
A1.3 – Technologický postup výroby postranice	68

A2 Přílohy týkající se konstrukce přístřihů

A2.1 – Postranice stavebnicového odporníku (výkres PSO-01-01)	69
A2.2 – Přístřih vytvořený pomocí BSE modulu (výkres PSO-01-02)	70
A2.3 – Přístřih vytvořený podle odborné literatury (výkres PSO-01-03)	71
A2.4 – Porovnání přístřihů postranice (výkres PSO-01-04)	72